

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

С. М. Фурманов

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ
КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ**

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета
<http://e.biblio.bru.by/>



Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2019

УДК 621.791.76

Рекомендовано к изданию Советом Белорусско-Российского университета
«26» декабря 2018 г., протокол № 6

Р е ц е н з е н т ы :

акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией кинетики кристаллизации Института технологии металлов НАН Беларуси *Е. И. Марукович*; канд. техн. наук, доц. кафедры «Теория и технология сварки материалов» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *Б. В. Федотов* (зав. кафедрой – д-р техн. наук, проф. *С. Г. Паршин*); д-р техн. наук, проф. *В. П. Березиенко*

Фурманов, С. М.

Пути совершенствования термодформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки: [монография] / С. М. Фурманов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – 267 с. : ил.

ISBN 987-985-492-222-5.

В монографии рассмотрены вопросы совершенствования термодформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки. Определены условия, обеспечивающие уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий при точечной сварке. Приведены рекомендации по выбору технологии Т-образной рельефной сварки. Разработана система активного контроля энергии тепловложения при контактной сварке. Рассмотрены вопросы построения корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в зону сварки.

Предназначена для студентов и аспирантов, а также для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий.

УДК 621.791.76

ISBN 978-985-492-222-5

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2019



Введение

Одной из основных задач развития машиностроения в Республике Беларусь является применение прогрессивных энерго- и материалосберегающих технологий, обеспечивающих высокий уровень качества выпускаемой продукции и повышение ее конкурентоспособности.

Многие технологические процессы контактной точечной и рельефной сварки являются одними из основных при получении неразъемных соединений при изготовлении автомобилей, тракторов, сельхозмашин, троллейбусов, лифтов, летательных аппаратов и др. На долю контактной сварки в настоящее время приходится более 30 % общего объема производства сварных конструкций. Она обладает рядом преимуществ, обусловленных её высокими показателями производительности, уровня автоматизации и механизации, экономической эффективности, экологической чистоты, гибкости и отсутствием потребности в специальных сварочных материалах.

Наряду с этим применяемые способы контактной точечной и рельефной сварки обладают рядом недостатков.

Деформации лицевых поверхностей изделий при точечной сварке, которые часто препятствуют ее применению, являются неотъемлемым следствием силового воздействия токоподводящих электродов на свариваемые детали. Глубина вмятины от электродов при двусторонней точечной сварке обычно составляет около 15...20 %, а при появлении выплесков достигает 30...40 % от толщины детали. Деформации лицевых поверхностей ухудшают товарный вид изделия и приводят к дополнительным затратам времени на их устранение. Задача уменьшения деформаций лицевых поверхностей изделий при контактной точечной сварке существует в машиностроении и других отраслях промышленности.

С точки зрения снижения себестоимости изготовления изделий, конструктивные особенности которых предполагают наличие малогабаритных сварных узлов, весьма эффективным технологическим процессом является контактная рельефная сварка Т-образных соединений. Однако отсутствие теоретических основ процесса образования Т-образных соединений вызывает сложности при определении параметров режима и требует проведения ряда дополнительных экспериментальных исследований для разработки технологии сварки конкретных изделий. Экспериментальные уточнения параметров режима в производственной практике связаны с дополнительными временными, материальными затратами и не всегда дают положительные результаты в плане обеспечения требуемых прочностных показателей и точности геометрических параметров соединений. Фактически не существует математических зависимостей, используя которые можно было бы определить форму и размеры

рельефов, а также параметры режима сварки исходя из геометрических размеров и материалов свариваемых деталей.

При производстве железобетонной арматуры, некоторых электротехнических и замочно-скобяных изделий имеется необходимость получения в течение одного цикла сварки неразъемных многослойных соединений, состоящих из трех и более деталей. При наличии в межэлектродной зоне нескольких последовательно или параллельно расположенных контактов деталь–деталь происходит неравномерный ввод электрической энергии в отдельные зоны расплавления, результатом чего являются дефекты: непровары, поры, выплески.

Перспективным направлением оптимизации параметров режима контактной точечной и рельефной сварки является математическое моделирование нелинейных задач на основе метода конечных элементов. Математическая модель термомодеформационного цикла должна учитывать с определенным приближением все существенные факторы, оказывающие непосредственное влияние на процесс сварки: распределение электрических и температурных полей в процессе протекания сварочного тока, изменение теплового и электрического сопротивлений контактов, упругопластические деформации и напряжения, плавление, кристаллизацию и др.

В настоящее время в области сварочного производства стремительно развивается также другое перспективное направление, связанное с разработкой систем автоматического управления процессами контактной точечной и рельефной сварки. При этом серийно выпускаемая аппаратура управления машин для контактной сварки в основном работает по жестко-программируемому циклу со стабилизацией сварочного тока и параметрической стабилизацией и не позволяет оптимизировать ввод электрической энергии в межэлектродную зону за счет использования обратных связей по другим параметрам процесса (мощность и энергия тепловложения, перемещение подвижного электрода, усилие сжатия электродов и др.).

Современные аналого-цифровые, микропроцессорные устройства позволяют не только регистрировать параметры сварочного процесса для последующего анализа и внесения в него корректировок, но и воздействовать на режимы сварки в реальном времени. Главная задача данного воздействия – обеспечение стабильного высокого качества формируемых сварных соединений без прерывания технологического цикла. Сопутствующая важная задача – снижение энергоемкости процесса сварки.

Исследованию перечисленных вопросов и посвящена настоящая работа. Автор надеется, что она будет полезна как научным работникам, так и специалистам по проектированию оборудования и разработке технологических процессов контактной точечной и рельефной сварки.



1 Основные направления совершенствования термомодеформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки

1.1 Способы уменьшения деформаций от электродов при точечной сварке на лицевых поверхностях изделий

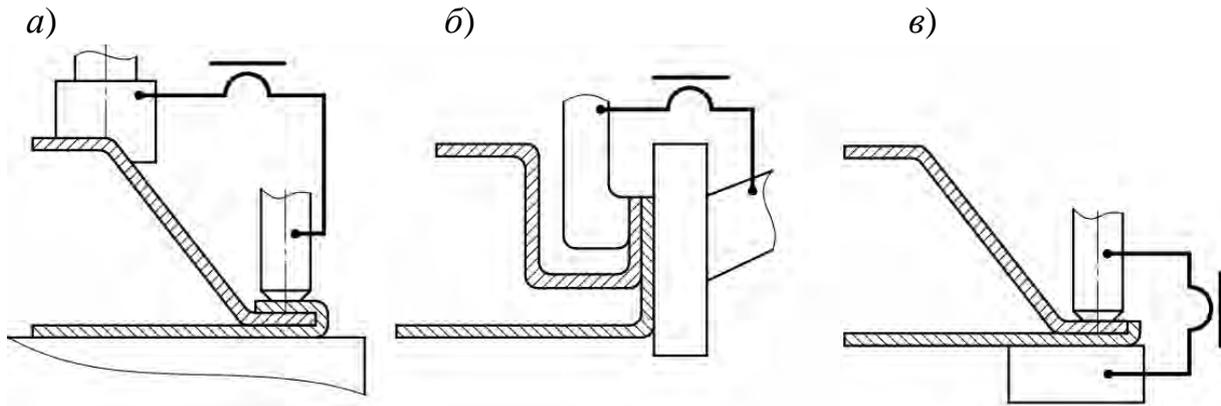
В конструкциях автомобилей, троллейбусов, тракторов, сельскохозяйственных машин, летательных аппаратов, лифтов и др. имеется большое количество точечных соединений. При этом на лицевых поверхностях изделий образуются вмятины от электродов. Наличие последних ухудшает товарный вид выпускаемой продукции, ее конкурентоспособность. Традиционные способы точечной сварки не позволяют получать требуемое качество лицевых поверхностей изделий, так как деформации являются неотъемлемым следствием силового воздействия токоподводящих электродов на свариваемые детали. Образование глубоких вмятин на лицевых поверхностях изделий способствует снижению статической и динамической прочности соединений. Поэтому в комплекс основных понятий о качестве сварных соединений, кроме диаметра литого ядра $d_{\text{я}}$ и прочности соединения на срез $P_{\text{ср}}$, входит также и глубина вмятин от электродов $g_{\text{вм}}$ [1, 2].

В автомобилестроении трудоемкость точечной и рельефной сварки составляет 70...80 % от общего объема сварки. Примером соединений на лицевых поверхностях может служить сварка кузовов легковых автомобилей. Высокие требования к качеству лицевых поверхностей предъявляются к боковинам и крышам кузовов легковых автомобилей, для которых применяют штамповочные конструкции, изготавливаемые из низкоуглеродистых тонколистовых сталей толщиной 0,8...1,5 мм.

При сборке современных конструкций кузовов легковых автомобилей правую и левую боковины выделяют как самостоятельные штамповочные конструкции. Боковина имеет дверной проем из отдельно штампованных деталей, которые сваривают точечной сваркой. Лицевую поверхность боковины сваривают через медные пластины большой толщины, которые могут являться частью фиксирующих приспособлений [2].

Панель крыши кузова представляет собой крупную объемную штампованную заготовку из стали толщиной 0,8 мм. Проемы окон крыши усиливают рамками, которые сваривают с крышей точечной сваркой. При выполнении данной операции важно получить меньшие следы от сварки с наружной стороны проема, поэтому при всех вариантах сварки детали с этой стороны укладывают на электрод с плоской рабочей поверхностью [2].

Двери, крышка багажника, капот – это отдельные узлы, соединяющиеся с кузовом или кабиной шарнирными петлями. Основные их крупные детали – наружные и внутренние панели. К ним приваривают точечной или рельефной сваркой значительное количество мелких деталей для крепления различной арматуры. Наружные панели этих узлов – лицевые детали, поэтому во избежание дополнительных работ по отделке поверхности после сварки применяют несколько различных вариантов их соединения (рисунок 1.1).



а – с полной подгибкой фланца; *б* – по отбортованной кромке; *в* – с подгибкой наружной панели

Рисунок 1.1 – Сварные соединения внутренних и наружных панелей на дверях, крышках багажников и капотах

При соединении с полной подгибкой фланца (см. рисунок 1.1, *а*) следы на лицевой поверхности от точечной сварки минимальные, т. к. литое ядро формируется в соединении внутренней панели с отогнутым фланцем наружной. В соединении, выполняемом точечной сваркой по отбортованной кромке (см. рисунок 1.1, *б*), место сварки видно при открытой двери. В соединении точечной сваркой внутренней и наружной панелей с подгибкой (см. рисунок 1.1, *в*) фланцы отсутствуют. Для уменьшения следов от сварки лицевую поверхность наружной панели необходимо располагать на электроде с плоской контактной поверхностью. Зачистка лицевой поверхности от следов точечной сварки при этом обязательна.

В некоторых конструкциях кузовов и кабин автомобилей сточный желобок представляет собой отдельную деталь. Его сварку с крышей в большинстве случаев выполняют при сборке и окончательной сварке кузова. В некоторых конструкциях (рисунок 1.2) желобок приваривают к фланцам крыши и усилителям проема ветрового окна. Поскольку в месте сварки образуется три толщины металла, это соединение получают в два этапа: шовно-точечной сваркой соединяют только крышку с деталями проёма, а желобок приваривают точечной сваркой к отбортовке крыши. Желобок не является силовым узлом и

его изготавливают из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5...0,6 мм. На подвесных точечных машинах при их ручном управлении не удастся обеспечить равномерного шага между точками и нормального расположения электродов к поверхности деталей, поэтому внешний вид данных соединений ухудшается, что недопустимо для лицевых поверхностей легковых автомобилей. Лучшие результаты можно получить, если для передвижения клещей использовать роботы. Уменьшение деформаций позволит избежать дополнительных производственных затрат времени и материалов на шлифовку лицевых поверхностей изделий.

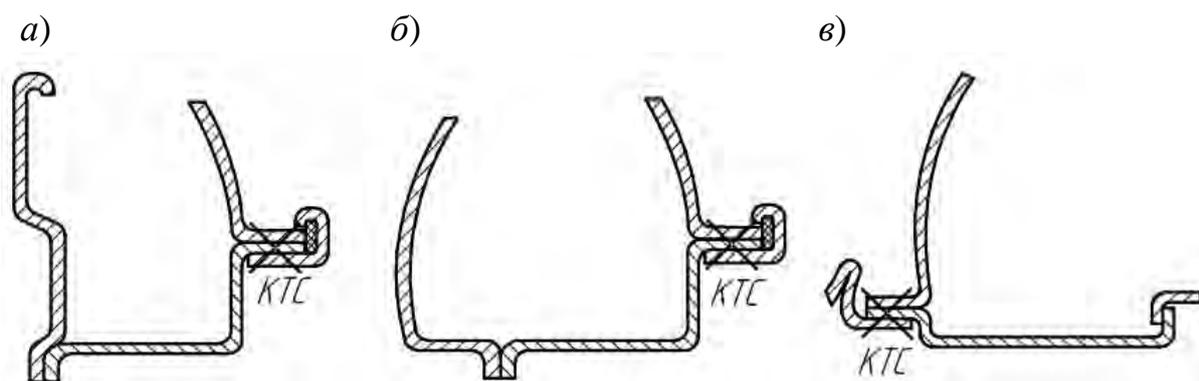


Рисунок 1.2 – Соединение сточного желобка с крышей

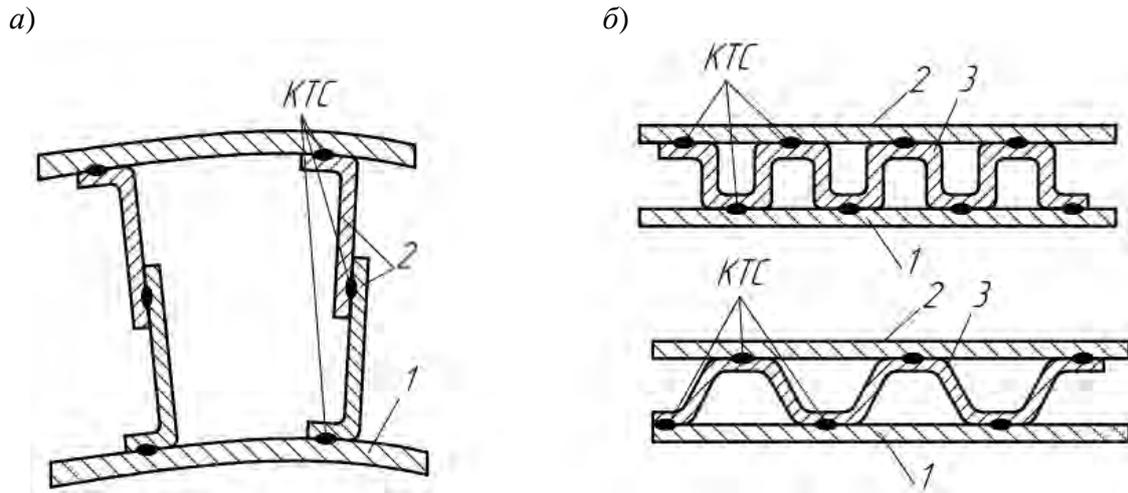
Исключение вмятин имеет особенно большое значение при изготовлении декоративных изделий, а также деталей летательных аппаратов [3–6]. Крыло самолета состоит из каркаса (продольного и поперечного силового наборов) и обшивки. Поперечный силовой набор состоит из нервюр, которые служат для придания крылу формы и жесткости в поперечном сечении, а также для соединения продольного набора с обшивкой.

При изготовлении несущих конструкций нервюры 2 (рисунок 1.3, а) ее разделяют на две части, и после приварки каждой части к листам обшивки 1 сваривают между собой внахлестку. Этим удастся компенсировать неточность изготовления и сборки нервюр и обеспечить гладкую поверхность несущих листов.

При изготовлении различных слоистых конструкций для увеличения их продольной устойчивости (рисунок 1.3, б) основные несущие листы 1 и 2 сваривают с гофром 3 точечной сваркой.

Нервюры воспринимают аэродинамическую нагрузку, а обшивка крыла придает ему обтекаемую форму и служит для передачи аэродинамических нагрузок каркасу. Поэтому к лицевым поверхностям данных сварных конструкций предъявляются повышенные требования [6].

Геометрические параметры точечного сварного соединения представлены на рисунке 1.4.



а – соединение нервюр; б – слоистые конструкции

Рисунок 1.3 – Рациональное конструирование сварных узлов в самолетостроении

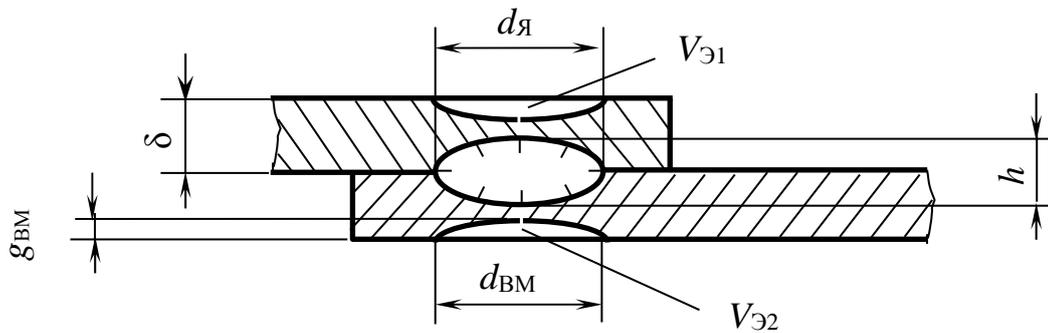


Рисунок 1.4 – Геометрические параметры точечного сварного соединения

Критерием оценки эффективности технологического процесса контактной точечной сварки, применяемого для снижения глубины вмятин от электродов на лицевых поверхностях изделий, может служить общая степень пластической деформации ε_0 [1].

$$\varepsilon_0 = V_{\text{СМ}} / V_{\text{Д}} \cdot 100 \% = (V_{\text{Э1}} + V_{\text{Э2}}) / V_{\text{Д}} \cdot 100 \% ; \quad (1.1)$$

$$V_{\text{Д}} = \left(\pi d_{\text{ВМ}}^2 / 2 \right) \cdot \delta , \quad (1.2)$$

где $V_{\text{Д}}$ – деформируемый объем столбика металла высотой 2δ и диаметром $d_{\text{ВМ}}$;

$V_{\text{СМ}}$ – смещенный объем;

$V_{\text{Э1}}$, $V_{\text{Э2}}$ – объемы металла, вытесненного верхним и нижним электродами соответственно.

При равенстве вмятин на верхней и нижней пластинах

$$V_{\text{Э1}} + V_{\text{Э2}} = \left(\pi d_{\text{ВМ}}^2 / 2 \right) \cdot g_{\text{ВМ}}; \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{(\pi d_{\text{ВМ}}^2 / 2) \cdot g_{\text{ВМ}}}{(\pi d_{\text{ВМ}}^2 / 2) \cdot \delta} \cdot 100 \% = \frac{g_{\text{ВМ}}}{\delta} \cdot 100 \%. \quad (1.4)$$

Согласно ГОСТ 15878–79 *Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры* величина ε_0 не должна быть больше 20 % толщины детали. В случае применения одного из электродов с увеличенной рабочей поверхностью, а также при сварке в труднодоступных местах допускается увеличение глубины вмятины со стороны обычного электрода до 30 % от толщины детали. Высота литого ядра h может находиться в пределах 20...80 % от суммарной толщины деталей [1, 4–6].

Причинами увеличения объема смещенного металла $V_{\text{СМ}}$ и образования глубоких вмятин могут быть малый диаметр контактной поверхности электрода, большой сварочный ток или время его протекания, перекося деталей в электродах или их неправильная установка, большое усилие сжатия электродов при сварке и проковке, выплески расплавленного металла.

Проблему улучшения внешнего вида соединений при контактной точечной сварке на производстве решают по-разному.

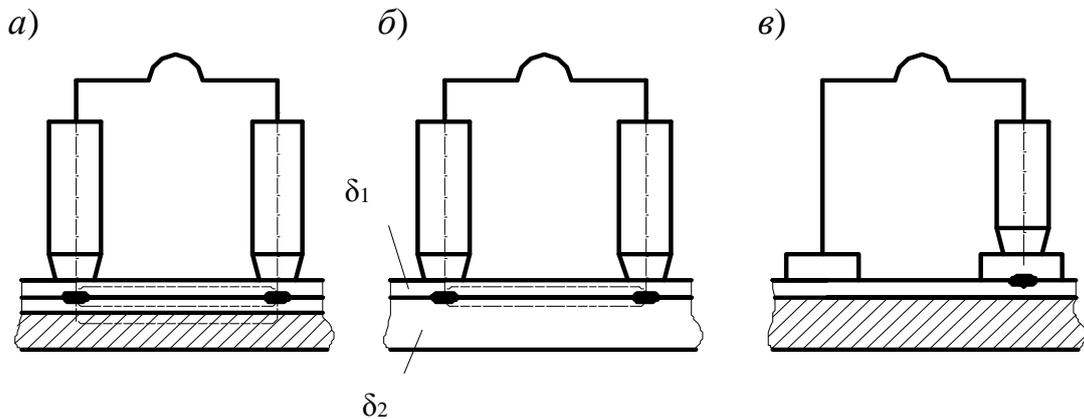
При односторонней сварке из-за значительного тока шунтирования и перегрева привариваемой детали возможны смещения литого ядра, вмятины и повышенный износ электродов. Детали равной толщины $\delta_1 = \delta_2$ или с соотношением $\delta_1 : \delta_2 = 1 : 3$ сваривают с применением со стороны другой детали токоведущей медной подкладки (рисунок 1.5, *а*), которая в процессе работы также изнашивается и требует зачистки или замены [1, 2].

При значительном различии в толщинах на узлах большой жесткости, способных воспринимать усилие сжатия электродов $F_{\text{СВ}}$ без продавливания, тонкую деталь к толстой можно приваривать без подкладки с предварительным подогревом (рисунок 1.5, *б*). Иногда применяется одноточечная сварка со вспомогательным электродом (рисунок 1.5, *в*).

Для уменьшения глубины вмятин от электродов с одной стороны изделия применяется несколько способов бесследной сварки [2, 4], которые заключаются в увеличении рабочей поверхности одного из электродов (рисунок 1.6, *а*) или введении между электродом и деталью пластинки из медных сплавов (рисунок 1.6, *б*). Плотность тока в контакте электрод–деталь со стороны лицевой поверхности уменьшается. Необходимая плотность тока в контакте деталь–деталь создается электродом с нормальной рабочей поверхностью. Для получения на поверхности детали минимального отпечатка в электроде с увеличенной рабочей поверхностью иногда делают небольшую лунку (рисунок 1.6, *в*). При этом на лицевой поверхности детали образовывается

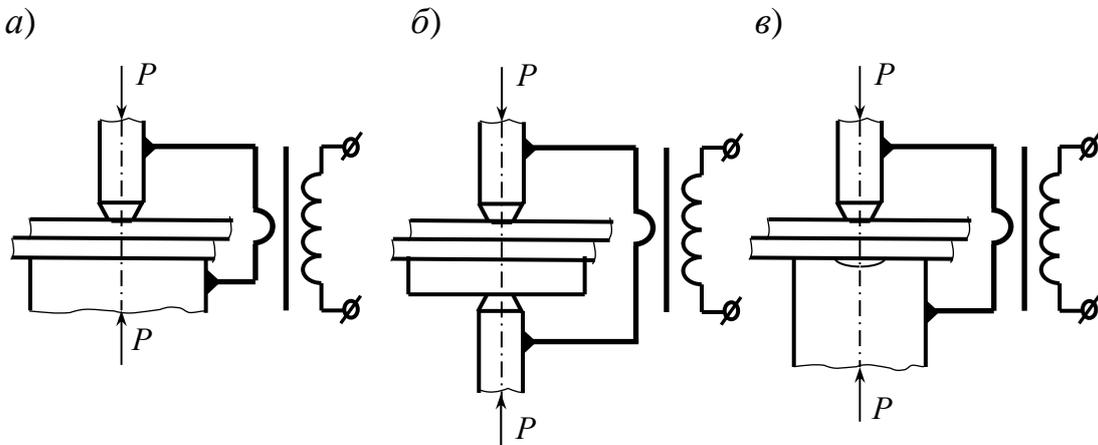


выпуклость, которая затем удаляется при зачистке. Применение «бесследной» сварки сопровождается износом нижнего электрода, возникновением односторонних вмятин, появлением выплесков и больших зазоров между свариваемыми листами. Полностью исключить следы от сварки не удастся, так как со стороны плоского электрода в любом случае остается небольшое углубление [3].



а – с применением токоведущей медной подкладки; *б* – с предварительным подогревом без подкладки; *в* – со вспомогательным электродом

Рисунок 1.5 – Схемы односторонней точечной сварки



а – с увеличенной рабочей поверхностью электрода; *б* – с применением пластинки из медных сплавов; *в* – с лункой на поверхности электрода

Рисунок 1.6 – Способы бесследной точечной сварки

Для повышения сопротивления деформации металла рекомендуется также применять электроды со сферической формой рабочей поверхности, позволяющей увеличить отвод теплоты в электроды и снизить температуру их рабочих поверхностей. Площадь начального электрического контакта между сферической поверхностью электрода и плоской поверхностью детали уменьшена, поэтому меньше и требуемый сварочный ток. Сферическую форму электродов

обычно используют для сварки металлов с пониженным сопротивлением деформации (алюминиевые, магниевые, титановые сплавы) при высоких требованиях к качеству (минимальные вмятины и зазоры, недопущение выплесков). При этом снижается склонность к выплескам и образованию больших вмятин и зазоров при смещении осей электродов, сварке деталей неравной толщины из разноименных материалов и односторонней сварке [3, 5, 7].

Для металлов с повышенным сопротивлением деформации (стали, жаропрочные сплавы) при сварке на стационарных машинах переменного тока с вертикальным ходом электродов и крутым фронтом нарастания сварочного тока применяют плоскую форму рабочей поверхности электрода с конусной заточкой, так как сферическая форма в этом случае не способствует снижению вероятности появления выплесков и глубоких вмятин [1].

Образование вмятин от электродов является следствием повышения температуры в контакте электрод–деталь и воздействия усилия сжатия электродов. Нагрев деталей сопровождается увеличением их линейных размеров. При плавлении объем металла становится больше на 8...10 % относительно начального. В условиях точечной сварки увеличение объема деталей происходит преимущественно в осевом направлении, так как его возрастание в радиальном направлении сдерживается более холодной массой соседних участков металла. При этом параллельно протекает процесс пластической деформации металла в зазор между листами и вдавливание электродов в детали.

Ранее была предпринята попытка определить основные факторы, обуславливающие характер упругопластического деформирования металла зоны соединения, и предложена схема расчета усилий и деформаций, возникающих при контактной точечной сварке (рисунок 1.7) [1].

Объемное напряженно-деформированное состояние металла характеризуется сжимающими радиальными σ_r , тангенциальными σ_θ и осевыми σ_z напряжениями, а также деформациями ε_r , ε_θ и ε_z . Уравнение термомодеформационного равновесия, связывающее параметры процессов нагрева, плавления и упругопластического деформирования, имеет следующий вид:

$$F_{CB} = F_J + F_{II} = P_J \frac{\pi d_J^2}{4} + \sigma_{\text{II,CP}} \pi \frac{d_{II}^2 - d_J^2}{4}, \quad (1.5)$$

где $\sigma_{\text{II,CP}}$ – среднее значение осевых нормальных напряжений в площади пластического пояса.

Факторами, способствующими увеличению деформаций лицевых поверхностей, названы большие зазоры и плохое сопряжение деталей, которые возникают из-за низкой точности их изготовления и сборки. При сварке с такими зазорами часть сварочного усилия тратится на их устранение. Тепло-



выделение в контакте между деталями возрастает. Усиливается склонность к образованию выплесков и глубоких вмятин [1–3, 8].

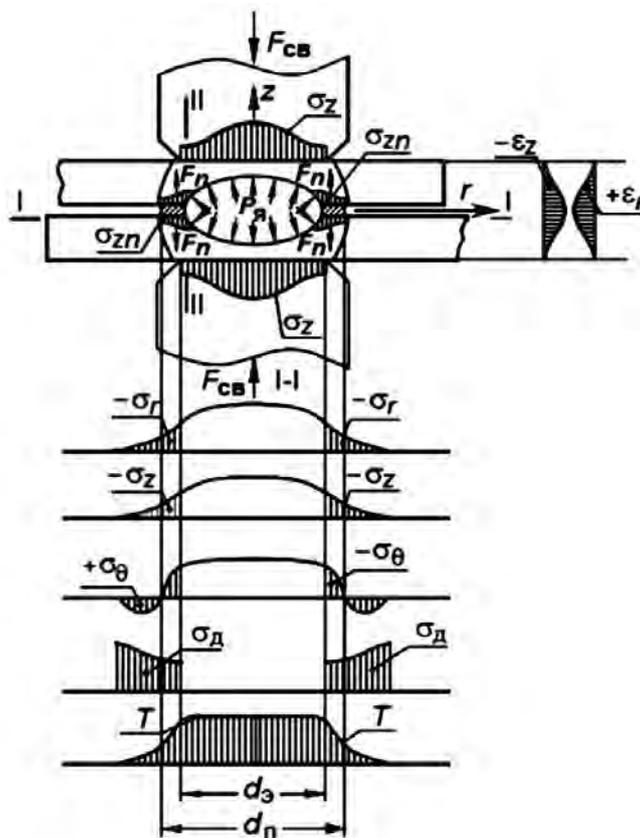


Рисунок 1.7 – Схема расчета усилий и деформаций при точечной сварке

Увеличение первоначального зазора между свариваемыми деталями вследствие теплового расширения металла в области контакта деталь–деталь, в который относительно свободно течет деформируемый металл, обуславливает малые значения осевых напряжений σ_z и сопротивления деформации σ_d на периферии контактов электрод–деталь и особенно на границе контакта деталь–деталь. Наибольшее же сопротивление деформации отмечается вблизи оси электродов, где напряженное состояние близко к всестороннему сжатию.

Наибольшая степень пластической деформации (ϵ_r , ϵ_θ , ϵ_z) наблюдается в области пластического пояска. При этом внутренняя граница металла пояска имеет температуру, близкую к температуре плавления, и низкое значение сопротивления деформации σ_d , а внешняя граница, соответственно, меньшую температуру и большее σ_d . Возникающие в процессе сварки сжимающие напряжения σ_{zn} и сила F_{Π} стремятся увеличить зазор между деталями [1, 8].

Повышенное ковочное усилие $F_{ков}$ на стадии проковки применяется для сокращения количества усадочных дефектов и снижения уровня растягивающих остаточных напряжений. Уменьшить его можно путем замедленного

охлаждения при использовании дополнительного импульса термообработки сварного соединения [1].

Жесткость режима сварки является немаловажным фактором, влияющим на деформирование сварного соединения. С уменьшением времени протекания сварочного тока $\tau_{\text{СВ}}$ повышается сопротивление деформации поверхностных слоев металла под электродом и глубина вмятины снижается. Увеличение $\tau_{\text{СВ}}$ при сварке на мягких режимах расширяет зону пластической деформации [1–3].

Увеличение интенсивности отвода тепла от свариваемых деталей в электроды позволяет снижать деформации [2]. Приложение усилия сжатия на некоторое время после окончания импульса сварочного тока способствует отводу теплоты. В случае слишком быстрого подъема электродов поверхность вмятины может интенсивно окисляться. Способствует снижению деформаций также наружное охлаждение зоны сварки, если свариваемые материалы не склонны к закалке и не взаимодействуют с водой [3].

Для уменьшения следов от сварки в основном применяют электроды с увеличенной рабочей поверхностью, одностороннюю сварку или вводят между электродом и деталью пластины из медных сплавов. Проведенный анализ показывает, что на практике для уменьшения деформаций лицевых поверхностей изделий существуют некоторые рекомендации и способы. Однако при применении данных способов полностью избежать появления деформаций от электродов невозможно, так как в любом случае на лицевой поверхности остается небольшое углубление.

Если заменить две свариваемые пластины одной, равной по размерам их суммарной толщине, то при нагреве до плавления глубина вмятины на поверхности уменьшается, так как сопротивление деформации в радиальном направлении весьма велико [1]. Наименьшим сопротивлением деформации при этом обладает металл, расположенный на периферии контактов электрод–деталь, и пластическая деформация проявляется в образовании рельефа (кольцевого буртика) на поверхности деталей.

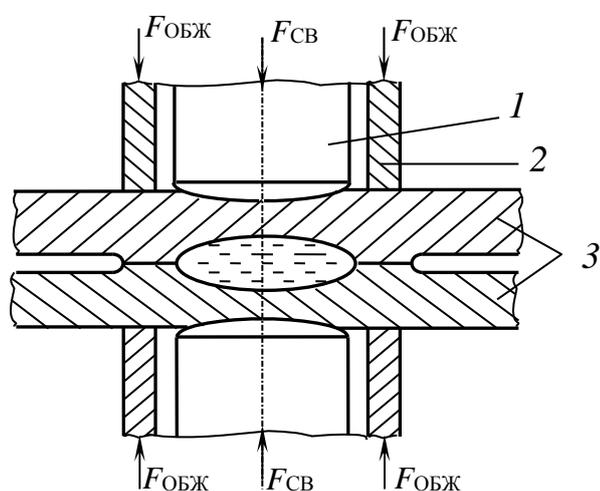
Проведенный анализ процессов образования вмятин на лицевых поверхностях показывает, что значительному уменьшению степени пластической деформации лицевых поверхностей изделий способствует создание такого напряженно-деформированного состояния металла зоны соединения, которое препятствует деформации в радиальном и осевом направлениях и увеличивает сопротивление пластическому течению металла из зоны сварного соединения к периферии сварной точки [4].

Эффективным средством снижения вероятности образования выплесков является применение регулируемого обжатия периферии сварной точки с помощью кольцевого пуансона, которое позволяет значительно расширить возможности точечной сварки [9, 10]. При этом усилие $F_{\text{ОБЖ}}$ к периферийной зоне прикладывают с помощью кольцевых пуансонов (рисунок 1.8). Положи-



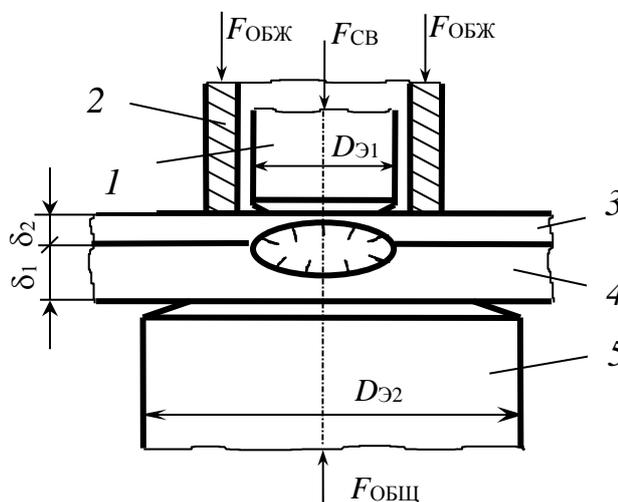
тельное влияние обжатия на процесс формирования соединения объясняется изменением характера пластических деформаций металла зоны сварки и перераспределением остаточных напряжений [11].

Способ контактной точечной сварки деталей неравной толщины с обжатием периферийной зоны представлен на рисунке 1.9 [12].



1 – электрод; 2 – кольцевой пуансон для обжатия периферийной зоны; 3 – свариваемые детали

Рисунок 1.8 – Схема точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения



1 – верхний электрод; 2 – пуансон; 3, 4 – свариваемые детали; 5 – электрод с увеличенной рабочей поверхностью

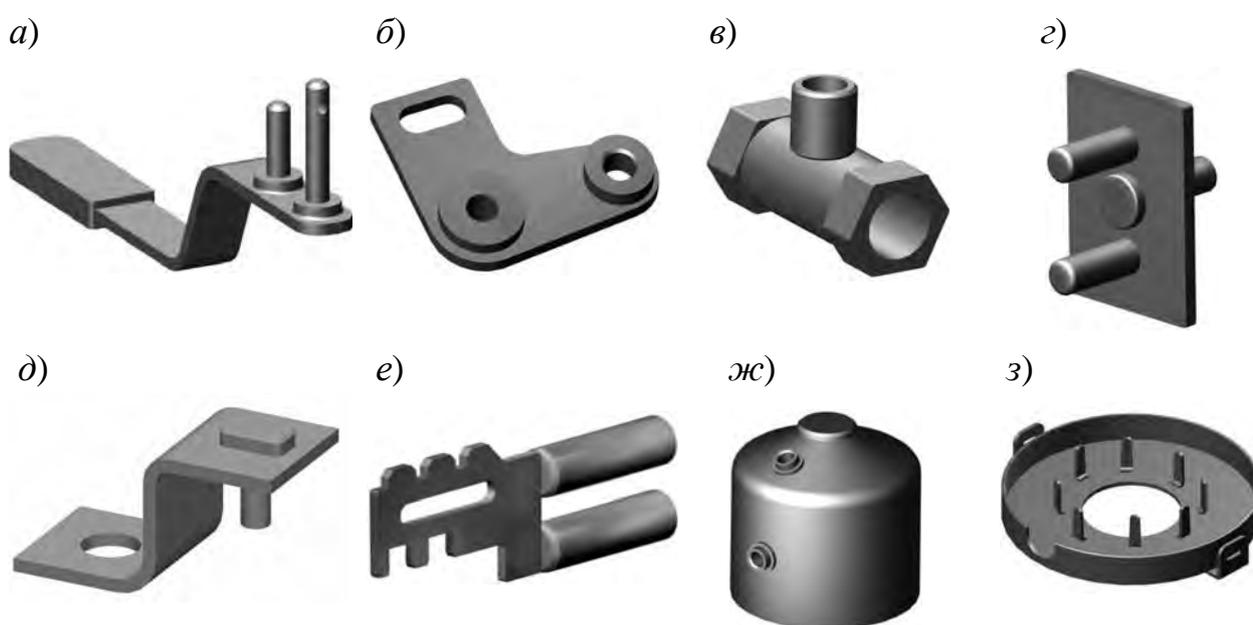
Рисунок 1.9 – Схема точечной сварки деталей разной толщины с обжатием периферийной зоны соединения

Экспериментальные исследования показали, что применение данного способа при жестких и мягких режимах исключает выплески, обеспечивает проплавление тонкой детали в пределах 30...70 % и способствует снижению сварочного усилия по сравнению с обычной сваркой [1].

Для применения вышеописанных схем контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны был разработан ряд электродных устройств [7, 9, 10, 13–20]. Однако предлагаемые электродные устройства, эффективно работающие в одиночном режиме сварки, зачастую не могут быть использованы в серийном и массовом производстве из-за сложности условий их эксплуатации. Поэтому данный способ нуждается в дальнейшем исследовании с целью повышения стойкости электродов и создания надежных и компактных электродных устройств.

1.2 Способы обеспечения точности геометрических параметров соединений, выполняемых рельефной сваркой

Контактная рельефная сварка применяется на предприятиях машиностроения при серийном и массовом производстве малогабаритных сварных узлов: ответственных деталей ходовой части автомобилей и тракторов (тормозных колодок, фланцев, осей, амортизаторов), пневмо- и гидроаппаратуры, элементов пассажирских лифтов (штуцеров, рычагов, кронштейнов), стальной арматуры, решеток, деталей крепежа, инструмента (рисунок 1.10). В качестве свариваемых материалов выступают низкоуглеродистые, среднеуглеродистые, легированные стали, реже – цветные металлы и их сплавы.



а – рукоятка растормаживания пассажирского лифта; *б* – рычаг пассажирского лифта; *в* – штуцер; *г* – натяжник цепи привода комбайна; *д* – кронштейн; *е* – засов замка сувальдного; *ж* – корпус фильтра; *з* – деталь шагового двигателя

Рисунок 1.10 – Типовые узлы, свариваемые рельефной сваркой

С точки зрения практики промышленного применения контактная рельефная сварка является высокопроизводительным энергосберегающим процессом, позволяющим одновременно добиться значительного снижения себестоимости продукции за счет экономии дорогих электродных материалов, уменьшения затрат труда и времени при исключении необходимости в частой зачистке и смене электродов, улучшения внешнего вида соединений, отсутствия на поверхности деталей вмятин от электродов, гибкости и простоты автоматизации сварочных операций [21, 22].

Одной из широко распространенных разновидностей рельефной сварки является сварка Т-образных соединений, эксплуатационные свойства которых

определяются заданными конструктивными и технологическими характеристиками: прочностными показателями, формой и геометрическими размерами, уровнем остаточных напряжений, размерами и количеством дефектов и т. д.

Для широкой номенклатуры изделий со сложным конструктивным оформлением, исходя из специфики их назначения, ГОСТ 30021–93 устанавливает жесткие требования к точности геометрических характеристик: предельным отклонениям линейных размеров и допускам формы и расположения поверхностей для механически необработанных сварных конструкций [23]. Стандарт распространяется на применяемые в машиностроении сварные конструкции, изготавливаемые из низкоуглеродистой и низколегированной сталей, и предусматривает шесть разрядов, которые определяют допустимые отклонения линейных размеров, допуски цилиндричности и профиля продольного сечения, а также допуски прямолинейности, плоскостности и перпендикулярности (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Разряды точности сварных конструкций

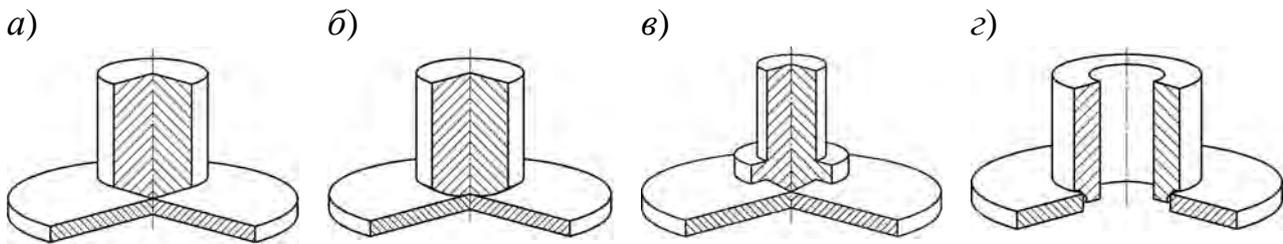
Допуски отклонения	Точность при разряде					
	1т	1	2	3	4	5
Линейных размеров	Высокая	Повышенная	Нормальная	Пониженная	Низкая	
Прямолинейности	–	+	+	+	–	
Плоскостности	–	+	+	+	–	
Перпендикулярности	–	+	+	+	–	
Цилиндричности и профиля продольного сечения	+	+	+	+	+	

Допуски линейных размеров и расположения поверхностей, перпендикулярности и цилиндричности для соединений, выполняемых контактной сваркой, обычно не превышают 0,5...1,0 мм, что соответствует разрядам точности 1т, 1, 2. Основным критерием для выбора разряда точности должны служить требования эксплуатации изделия.

При использовании дуговых способов сварки указанных узлов возникают трудности с обеспечением требуемых допусков из-за пластических деформаций, которым подвержены детали в процессе протекания термического цикла дуговой сварки. Для получения требуемой точности размеров и формы сварного изделия в данном случае применяют припуски на механическую обработку сборочной единицы, осуществляемую после выполнения сварки. Необходимость в механической обработке повышает трудоемкость изготовления изделий, увеличивая их себестоимость. Для подобных изделий применение рельефной сварки даёт возможность без дополнительных операций механической обработки выдерживать вышеуказанные требования к точности геометрических характеристик свариваемых деталей.



Соединение деталей при рельефной сварке происходит за счет концентрации сварочного тока в местах соприкосновения деталей по поверхности, ограниченной локальными выступами – рельефами. Точное размещение зоны сварки при этом определяется расположением искусственных рельефов или же естественной геометрической формой деталей. Конструктивные особенности рассматриваемых изделий предполагают возможность использования рельефов различной формы (рисунок 1.11).



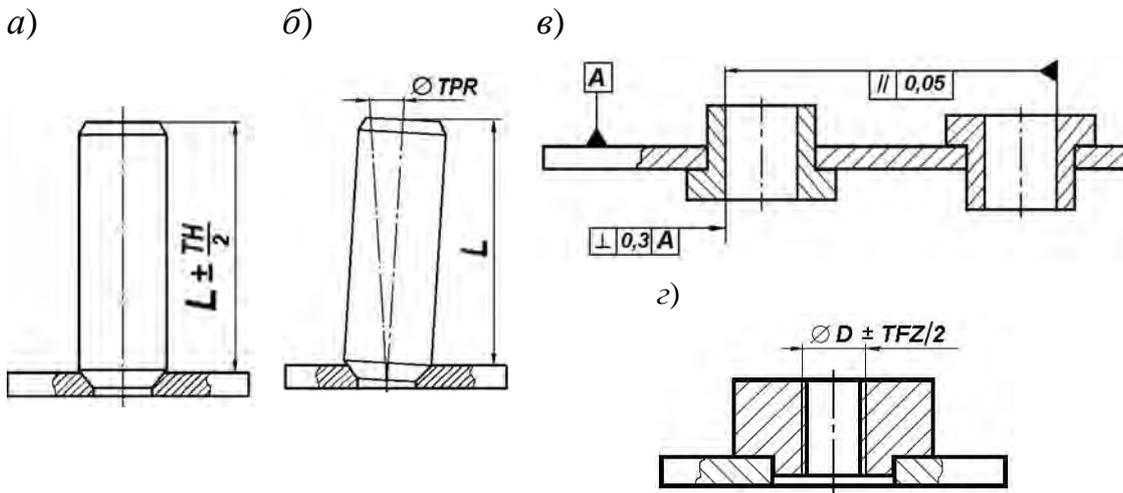
а – конусообразная; *б* – сферическая; *в* – с заплечиком для осуществления токоподвода к зоне сварки; *г* – «острой гранью»

Рисунок 1.11 – Формы рельефов для сварки Т-образных соединений

Минимизация отклонений от номинальных размеров достигается благодаря равномерности и малому времени нагрева зоны соединения (доли секунды) и более низкой, чем при дуговой сварке, температуре нагрева (1373...1473 К). Экономическая эффективность применения рельефной сварки вместо малопродуктивных и трудоемких процессов дуговой сварки и пайки особенно значительна в условиях серийного и массового производства. Изменяя форму и размеры рельефа, можно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки, а следовательно, и на точность геометрических параметров. Взаимное расположение соединенных деталей отличается от проектного вследствие воздействия термдеформационного цикла сварки, вызывающего изменения линейных и угловых размеров, а также структуры металла.

Анализ технических требований к свариваемым изделиям показал, что точность их геометрических параметров определяется допустимыми отклонениями линейных размеров по длине L (рисунок 1.12, *а*), отклонением от перпендикулярности оси относительно плоскости (рисунок 1.12, *б*), отклонениями параллельности и перпендикулярности (рисунок 1.12, *в*), а также отклонениями цилиндричности резьбового отверстия бобышки (рисунок 1.12, *г*) [24, 25].

Преобладающее большинство дефектов сварных соединений (таблица 1.2) вызвано нерациональным выбором параметров режима сварки, формы и размеров применяемых рельефов. Следствием возникновения данных дефектов является нарушение точности сварных соединений.



a – величина допуска линейного размера (TH); *б* – величина допуска перпендикулярности оси относительно плоскости (TPR); *в* – допуски параллельности и перпендикулярности; *г* – допуск цилиндричности (TFZ) резьбового отверстия бобышки

Рисунок 1.12 – Параметры точности Т-образных сварных соединений

Таблица 1.2 – Нарушение точности геометрических параметров в Т-образных сварных соединениях при возникновении дефектов

Вид дефекта и причина его возникновения	Внешний вид соединения
Выплески на лицевых и резьбовых поверхностях изделия из-за нерационального выбора параметров режима сварки «острой гранью» и формы рельефа	
Непровар из-за непараллельности поверхностей свариваемых деталей	
Непровар из-за нерационального выбора параметров режима сварки	

Наличие выплесков расплавленного металла не позволяет получать соединения с требуемыми линейными допусками, а также допусками расположения поверхностей деталей.

Без использования специальных технологических приемов подобные отклонения оказываются неизбежными и, безусловно, влияют на механические свойства и геометрические параметры сварных соединений. Отсутствие нормативной базы, регламентирующей и устанавливающей требования к применяемым рельефам, вызывает трудности при выборе основных параметров режима сварки, а значит, и при прогнозировании геометрических характеристик и прочности сварных соединений.

В условиях серийного и массового производства отклонения в размерах готовых изделий возникают также из-за износа электродов, вследствие чего появляется несоосность и неперпендикулярность деталей, их скольжение. Непараллельность рабочих поверхностей электродов ввиду их износа приводит к несоблюдению параллельности соприкасающихся плоскостей свариваемых деталей в месте начального контакта, местному перегреву и ухудшению качества сварки. В условиях серийного и массового производства неперпендикулярность образующей и неплоскостность торцевой поверхностей деталей не должны превышать 0,1 мм [26].

Электродная оснастка должна обеспечивать рациональный подвод тока к свариваемым деталям, тепловое равновесие в зоне соединения с целью предотвращения неравномерного нагрева свариваемых деталей и необходимую степень охлаждения электродов.

1.3 Повышение качества сварных соединений, получаемых рельефной сваркой в твердой фазе

Особенностью процесса образования соединений при рельефной сварке является то, что он осуществляется при интенсивной радиально направленной пластической деформации металла рельефа. Эта деформация в 10...15 раз больше, чем при точечной сварке. Идет интенсивное разрушение поверхностных пленок, появление активных центров, схватывание с образованием связей в твердом состоянии [27].

Рельефная сварка T-образных соединений, как правило, происходит в твердой фазе, т. е. при отсутствии зоны взаимного расплавления. В данном случае требуемый размер зоны сварного соединения и прочностные характеристики в значительной степени определяются необходимостью обеспечения таких показателей, как:

- нормативные значения прочности соединений;
- отсутствие внешних дефектов, связанных с термомеханическими процессами при сварке (выплесков, деформаций изделия, вмятин).



Для получения надежных соединений при сварке в твердой фазе необходима совместная пластическая деформация металла свариваемых деталей, приводящая к разрушению оксидных пленок, активации контактных поверхностей, образованию между ними физического контакта и объемного взаимодействия [27]. Если условия процесса исключают возможность пластической деформации металла в нужном объеме, то прочность соединений в твердой фазе оказывается низкой и нестабильной. Универсальной основой получения сварных соединений с требуемыми показателями качества является оптимизация параметров технологического процесса, базирующаяся на изучении кинетики формирования сварного соединения в твердой фазе на всех стадиях образования соединения.

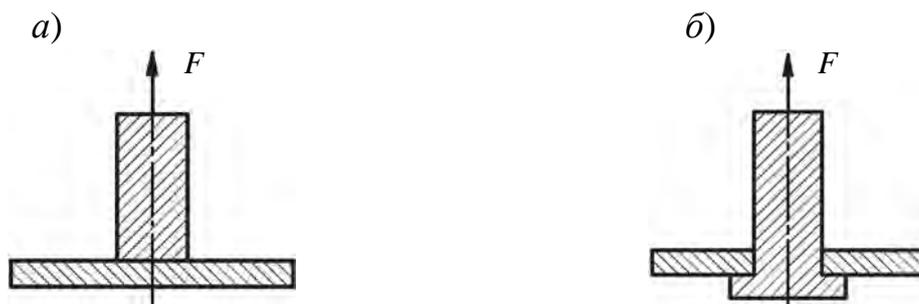
Главные трудности с использованием в промышленности такого прогрессивного способа, как рельефная сварка, связаны с большим разнообразием конструктивных форм свариваемых деталей и отсутствием обобщенных рекомендаций по выбору основных параметров режима сварки и геометрических характеристик применяемых рельефов. Теоретические основы рельефной сварки Т-образных соединений еще не разработаны, а параметры режима сварки определяются только экспериментальным путем [21, 22, 28].

Вопросы качества сварных соединений, получаемых в твердой фазе, изучены недостаточно. Отсутствие систематизированных данных по механическим свойствам таких соединений затрудняет определение области их возможного применения и не позволяет однозначно оценить их несущую способность. Следовательно, одним из направлений исследований является определение качественных показателей процесса в соответствии с требованиями к сварным соединениям, установление взаимосвязи между данными показателями и параметрами режима сварки.

Решение поставленной задачи позволит сократить расход сварочных материалов и электроэнергии, повысить производительность труда в 3...5 раз по сравнению с дуговой сваркой, улучшить санитарно-гигиенические условия на рабочих местах [1, 29, 30].

Для сварных соединений, воспринимающих при эксплуатации циклические нагрузки, применение рельефной сварки с формированием соединения в твердой фазе возможно при условии, что максимальное напряжение цикла не превышает значения, равного $0,1\sigma_T^{пл}$ ($\sigma_T^{пл}$ – предел текучести материала свариваемой детали, Па) [26]. Если это условие не соблюдается, то при проектировании изделий необходимо вносить конструктивные изменения, позволяющие изменить вид нагрузки сварного узла. Например, целесообразно использовать сварные соединения, работающие не на отрыв (рисунок 1.13, а), а на сжатие (рисунок 1.13, б). При этом основную часть рабочей нагрузки воспринимает основной металл, а не зона сварки.





a – отрыв; *б* – сжатие

Рисунок 1.13 – Схема работы сварного соединения под внешней нагрузкой F

Исследованием прочностных показателей соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, получаемых рельефной сваркой, занимался ряд зарубежных ученых [31–35]. Эти исследования базировались на эмпирических данных, полученных на основе изучения макрошлифов сварных соединений на различных стадиях процесса сварки, и прочностных испытаниях сварных соединений и позволили детально проследить кинетику формирования сварного соединения, процесс деформации рельефа, образование и развитие литого ядра.

Среди отечественных авторов разработкой теоретических и технологических основ процесса рельефной сварки занимались А. С. Гельман [36], В. А. Гилевич [27], А. И. Гуляев [2], П. Л. Чулошников [37], Э. С. Каракозов [38, 39], В. П. Березиенко [40, 41], а также чехословацкие исследователи М. Липа, Я. Голасек [42] и др. Накопленный практический опыт применения рельефной сварки на отечественных и зарубежных промышленных предприятиях содержит рекомендации по выбору основных параметров режима сварки для конкретных типоразмеров сварных соединений. При этом ориентировочные значения параметров рельефной сварки для каждого конкретного типа соединения большинство авторов [2, 27, 42] определяют исходя из максимальной площади зоны контакта между деталями. Но эти данные, представленные, как правило, в табличном виде, требуют корректировки в соответствии с результатами производственных механических испытаний, так как такие важные факторы, как условия токоподвода и теплоотвода в сварочном приспособлении, теплофизические свойства свариваемых материалов, остаются неучтенными.

Э. С. Каракозовым в [38, 39] использовался метод экспериментального моделирования процесса рельефной сварки Т-образных соединений на образцах из никеля (материал не претерпевает фазовых превращений), имитирующих сварное соединение (рисунок 1.14). Им проведены исследования по установлению закономерностей образования соединений при рельефной сварке «острой гранью», предложены условия получения качественных сварных соединений в твердой фазе и рекомендации по выбору угла рельефа α ,

детально изучено влияние скорости пластической деформации на процесс образования соединения.

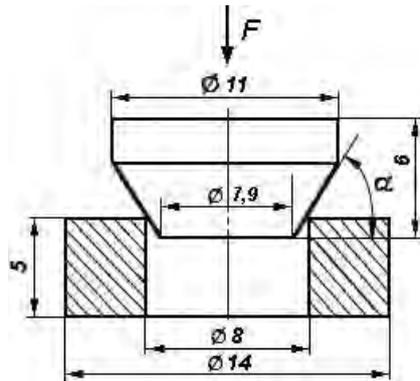


Рисунок 1.14 – Эскиз технологического образца для исследования процесса Т-образной сварки «острой гранью»

Установлено, что при увеличении сварочного тока и времени его протекания возрастает абсолютная деформация свариваемого образца ε , определяемая по следующей зависимости:

$$\varepsilon = h(\tau) \cdot \sin \alpha, \quad (1.6)$$

где $h(\tau)$ – экспериментально полученное изменение перемещения подвижного электрода в процессе сварки, мм.

Анализ результатов исследований, приведенных в отечественных и зарубежных литературных источниках, показывает, что наиболее изученными являются сварные соединения, которые имеют развитую зону взаимного расплавления (в основном сварка листов внахлестку с использованием выштампованных круглых и продолговатых рельефов). Для данных типов рельефной сварки разработаны многочисленные рекомендации по выбору оптимальных форм и размеров рельефов: это рекомендации отечественных и зарубежных авторов [2, 27, 42], а также технических групп – американского общества сварщиков (AWS) и промышленной ассоциации контактной сварки (RWMA), Международного института сварки (IIW).

Широкий ряд исследований посвящен обеспечению требуемых свойств сварных соединений посредством оптимизации размеров и форм применяемых рельефов. Примером может служить применение рельефов с кольцевыми углублениями [2, 41], способ рельефной сварки трубной заготовки с листом [43], способ контактной рельефной двухконтурной сварки штуцера с корпусом [44].

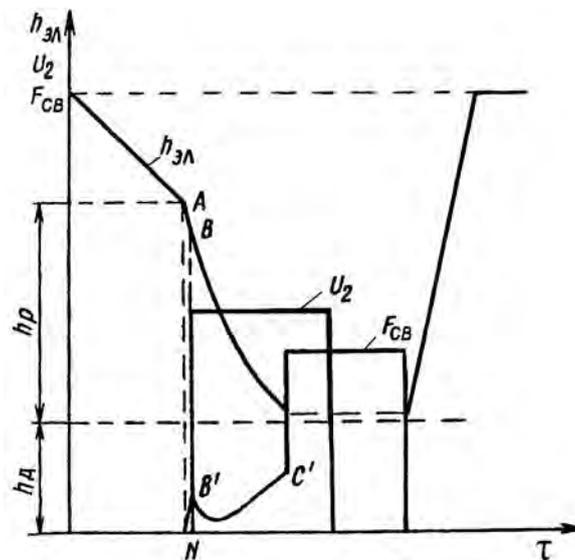
Необходимым условием получения сварных соединений с высокой и стабильной точностью геометрических показателей является применение научно обоснованной методики выбора величины и формы сварочного тока, усилия сжатия электродов, длительности протекания сварочного тока при

заранее известных форме и размерах рельефов. Примером может служить способ рельефной сварки с управляемым процессом деформации рельефов [45]. Одним из задаваемых параметров режима сварки являлась скорость перемещения подвижного электрода при деформации рельефа

$$V = \frac{A}{B + h_{\text{ЭЛ}}}, \quad (1.7)$$

где A, B – константы, определяемые экспериментально;
 $h_{\text{ЭЛ}}$ – текущее значение перемещения электрода.

На рисунке 1.15 представлена циклограмма процесса рельефной сварки. После сближения электродов на расстояние, равное суммарной толщине деталей $h_{\text{Д}}$ и высоте рельефов $h_{\text{Р}}$, в точке A включалась заданная оптимальная программа перемещения подвижного электрода. С некоторым запаздыванием появлялось в точке N усилие сжатия электродов $F_{\text{СВ}}$, которое быстро нарастало до точки B' , соответствовавшей моменту включения сварочного тока в точке B . После включения сварочного тока происходил быстрый спад $F_{\text{СВ}}$ с последующим медленным нарастанием, зависящим от соотношения между скоростями деформации и нагрева рельефа. В точке C' после полной деформации рельефа усилие сжатия электродов автоматически возрастало до максимальной величины и оставалось постоянным. Завершалась сварка отключением сварочного тока и последующим возвратом подвижного электрода в исходное положение [45].



$h_{\text{ЭЛ}}$ – перемещение электрода; $h_{\text{Д}}$ – суммарная толщина деталей; $h_{\text{Р}}$ – высота рельефов; U_2 – вторичное напряжение сварочного трансформатора; $F_{\text{СВ}}$ – усилие сжатия электродов при сварке

Рисунок 1.15 – Циклограмма процесса рельефной сварки

Такое управление процессом способствует выравниванию термомеханического воздействия на рельеф благодаря относительно мягкому режиму с небольшими усилиями сжатия рельефа при начальной стадии его деформации и существенному возрастанию усилия сжатия в конечной стадии формирования соединения.

В. П. Березиенко в [40] представил комплекс причинно-следственных моделей образования основных видов дефектов при рельефной сварке в виде графов, что позволило функционально описать связь технологии с дефектностью, определить значимость обобщенных параметров технологического процесса в образовании дефектов и установить степень влияния этих параметров на качество соединений. Согласно исследованиям на основные показатели сварных соединений при рельефной сварке оказывает влияние комплекс следующих факторов:

- рациональный выбор формы и размеров применяемых рельефов, соблюдение ТУ на их изготовление;
- величина сварочного тока;
- длительность протекания сварочного тока;
- величина усилия сжатия электродов, динамические характеристики механизма сжатия машины;
- выбор оптимального сварочного оборудования, конструкции электродной оснастки;
- износ рабочих поверхностей электродов, правильность установки деталей в приспособлении.

Установлено, что наиболее значимым на производственном уровне фактором является качество работы исполнителей и оборудования. Исходя из этого, получение сварных соединений с высокими, стабильными характеристиками точности и прочностными показателями в большой степени зависит от соблюдения исполнителями технологической дисциплины.

Снижению влияния человеческого фактора способствует применение систем автоматического регулирования, обеспечивающих стабильные результаты сварки на основе своевременного реагирования на появление недопустимых отклонений информативных параметров, по которым осуществляется активный контроль быстропротекающих процессов сварки.

Спецификой протекания процесса рельефной сварки Т-образных соединений является значительное перемещение подвижного электрода вследствие интенсивного нагрева и перехода металла рельефа в пластическое состояние. При этом из-за инерционности механизма сжатия привода контактной машины требуемая максимальная скорость сближения деталей не всегда может быть обеспечена. Происходит существенное снижение фактического усилия сжатия



свариваемых деталей и, как следствие, возникновение начальных выплесков расплавленного металла в контакте деталь–деталь, значительно ухудшающих прочностные характеристики сварных соединений. Для устранения этого необходим рациональный выбор сварочного оборудования, имеющего минимальную массу подвижных частей, низкое трение в направляющих привода сжатия машины, исключающее возможность его заклинивания [2, 36].

Проведенный анализ литературных источников показал, что большинство отечественных и зарубежных исследований процесса рельефной сварки базировались на полностью экспериментальном подходе, не предполагали каких-либо научно обоснованных путей решения поставленной задачи и посвящались разработке технологии сварки конкретных изделий из отдельных видов материалов.

Решение проблемы обеспечения необходимой прочности и точности геометрических параметров сварных соединений не имело системного характера. Данный вопрос в большей степени рассматривался только с точки зрения разработки специализированных электродных устройств, при этом многие предложенные способы рельефной сварки часто не могут быть использованы в серийном производстве из-за сложности и ненадежности конструкции электродных устройств.

Теоретические основы процесса рельефной сварки недостаточно проработаны, определение параметров режима сварки, в том числе и геометрических параметров применяемых рельефов, осуществляется главным образом опытным путем без должного теоретического и экспериментального обоснования, что приводит к образованию различного рода дефектов и нестабильности показателей качества сварных соединений.

Как основной инструмент для определения параметров режима рельефной сварки, обеспечивающих требуемые показатели качества соединений, необходимо выбрать детальное изучение кинетики формирования соединений с использованием математического моделирования процесса, которое позволит определить оптимальные законы регулирования, оказывающие влияние на работоспособность и точность геометрических параметров получаемых сварных соединений.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что для решения поставленной задачи необходимо:

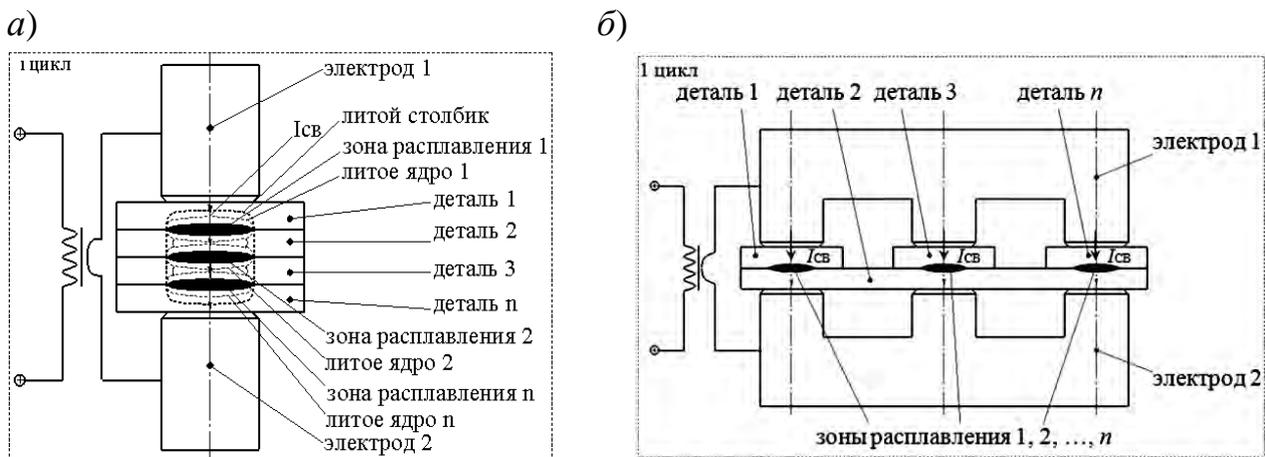
- рациональное проектирование сварных соединений с учетом их технологичности и вида эксплуатационных нагрузок;
- научно обоснованный выбор оптимальных параметров режима сварки (формы и размеров рельефов, усилий сжатия электродов, величины и формы импульса сварочного тока, длительности протекания сварочного тока), базирующийся на глубоком изучении кинетики формирования соединений и установлении закономерностей протекания термомодеформационного цикла сварки;



- выбор основного оборудования для реализации процесса сварки с учетом его динамических характеристик, а также соответствующей электродной оснастки;
- строгое соблюдение исполнителями технологической дисциплины производства.

1.4 Способы обеспечения прочности многослойных соединений, выполняемых точечной и рельефной сваркой

Многослойные соединения, которые в технической литературе также называют пакетными или ступенчатыми [27, 42, 46–52], представляют собой соединения трех и более деталей, полученные за один цикл сварки, т. е. за одну сварочную операцию при последовательном или параллельном протекании сварочного тока через контакты с образованием двух и более литых зон. Возможно объединение последовательных зон расплавления в одну. Применительно к контактной точечной сварке (КТС) многослойных соединений схемы процесса упрощенно выглядят так, как показано на рисунке 1.16. Схемы рельефной сварки многослойных соединений представлены на рисунке 1.17.



a – при последовательном протекании тока; *б* – при параллельном протекании тока

Рисунок 1.16 – Схемы точечной сварки многослойных соединений

Многослойные соединения нашли широкое применение при производстве замочно-скобяных и арматурных изделий, пакетов статоров асинхронных электродвигателей и магнитопроводов сварочных трансформаторов из электротехнических сталей (рисунок 1.18), а также тонколистовых и микросварных соединений проводов и кабелей [27, 42, 46, 53].

Основными заводскими способами получения многослойных соединений традиционно являются: контактная точечная сварка; точечная и рельефная

конденсаторная сварка; холодная сварка и штамповка; дуговые способы сварки.

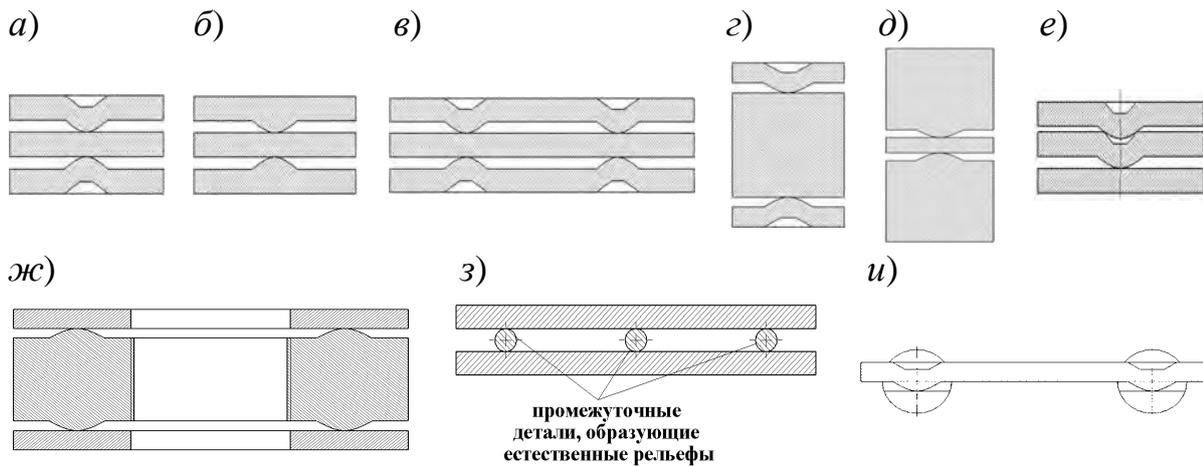
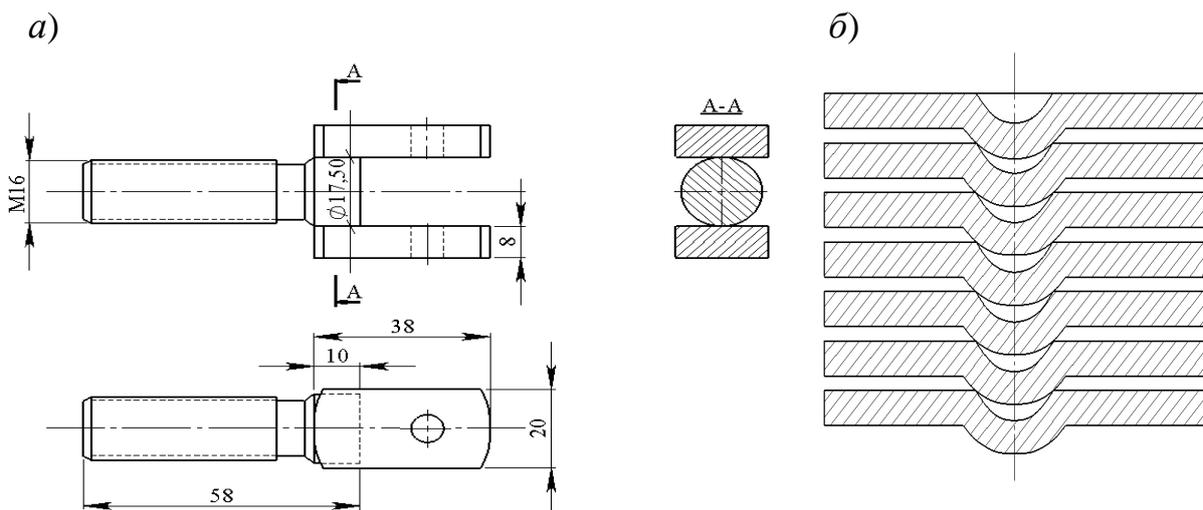


Рисунок 1.17 – Схемы рельефной сварки многослойных соединений

В Республике Беларусь многие предприятия имеют в своем составе цеха по производству малогабаритных изделий, таких как штуцера, болты, гайки, усилители, держатели гаек, кронштейны, держатели крепежа. На заводах по производству железобетонных конструкций и арматуры, на заводах электротехнического профиля используются соединения трех и более деталей, причем существует необходимость получения данных соединений за один цикл сварки, что объясняется требованием повышения производительности, снижения энерго- и материалоемкости производства.



a – откидной болт арматуры; *б* – пластины магнитопровода сварочного трансформатора

Рисунок 1.18 – Многослойные соединения

Процесс сварки таких соединений имеет некоторые отличительные особенности по сравнению со сваркой соединений из двух деталей:

- увеличенные в 1,5...2 раза начальные холодные сопротивления контактов $r_{к0}$ в межэлектродной зоне;
- увеличенное перемещение верхнего подвижного электрода $h_{Э}$ в процессе сварки;
- повышенное усилие сжатия электродов;
- значительное шунтирование сварочного тока.

При этом на зону сварки влияет комплекс возмущающих воздействий, таких как колебания напряжения питающей сети, изменение усилия сжатия электродов вследствие инерционности привода контактной машины и перепадов сетевого давления, изменение параметров вторичного контура контактной машины, повышенное шунтирование сварочного тока по периферии деталей и др. [22, 27, 54].

В производственных условиях на зону сварки могут оказывать негативное влияние такие факторы, как неправильный выбор параметров режима сварки для конкретного типа соединения, неправильный выбор циклограммы процесса сварки, ненадлежащая периодическая зачистка электродов, плохая подготовка поверхностей деталей перед сваркой и др.

Указанные факторы неизбежно приводят к нестабильному тепловложению в зону сварки, повышенным тепловым потерям, что в конечном итоге негативно сказывается на ходе формирования литых зон требуемых размеров и формы. В таких условиях обеспечить стабильное качество многослойного соединения крайне сложно, поэтому действующие заводские способы получения многослойных соединений сталкиваются со следующими основными проблемами.

1 При КТС отсутствуют технологические рекомендации и расчеты требуемого количества электрической энергии, вводимого в зону сварки для формирования качественного соединения. При этом регуляторы цикла сварки задают импульсы сварочного тока с большой крутизной нарастания (даже в режиме модуляции). Приближенный режим сварки приводит к появлению выплесков, пор и прожогов (при перегреве), а также непроварам и формированию соединений в твердой фазе (при увеличенном теплоотводе из зоны сварки). Расход электроэнергии при этом чаще всего завышается, что нежелательно в условиях крупносерийного производства.

2 Статистика прочностных испытаний точечных многослойных соединений трех деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 2,5 + 2,5 + 2,5 мм, сваренных на режиме по литературным рекомендациям для схожей суммарной толщины [2], свидетельствует об отсутствии стабильности процесса сварки, что в конечном итоге сказывается на разбросе до 50 % значений прочности среза $P_{СР}$ формируемых многослойных соединений (рисунок 1.19).



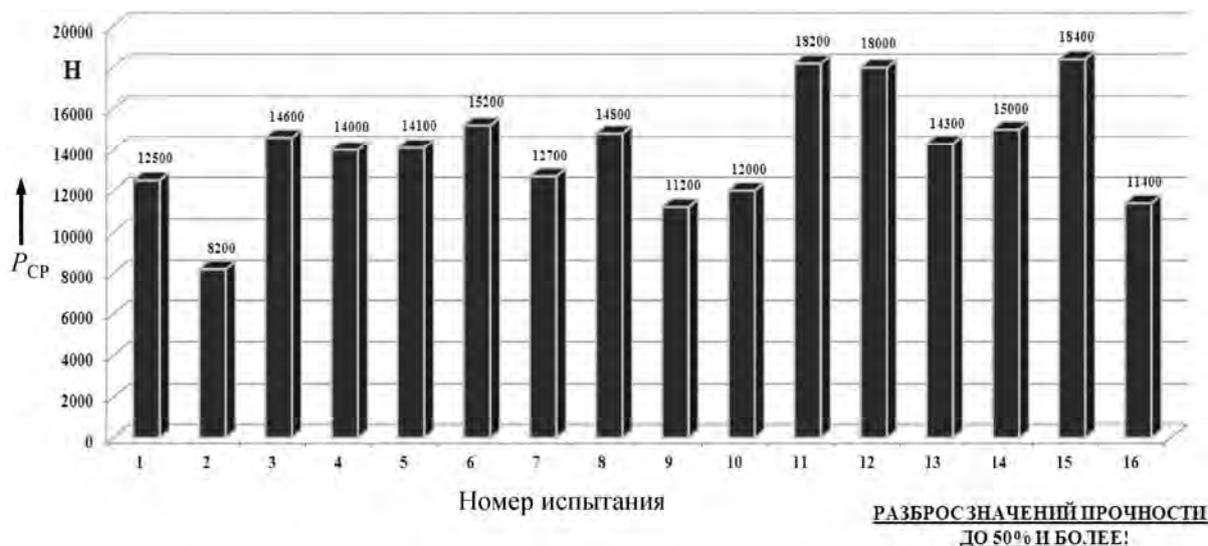


Рисунок 1.19 – Диаграмма прочностных испытаний точечных многослойных соединений

3 Точечная и рельефная конденсаторная сварка применима преимущественно к тонколистовым деталям ввиду малого количества электрической энергии, необходимого для введения в зону формирования таких соединений. К рельефам при конденсаторной сварке предъявляются повышенные требования жесткости и прочности [46], выполнение которых в условиях приложения больших сварочных усилий при соединении большого количества деталей пакета не всегда удается обеспечить.

4 Холодная сварка, а также штамповка, сопровождающиеся процессами схватывания металла в зоне контактирования, не позволяют обеспечить прочность и точность многослойных соединений. Например, на ОАО «Могилевский завод «Строммашина» при получении соединений деталей засова замка сувальдного способом штамповки в итоге соединение ригеля со стержнями в ряде случаев можно расшатать вручную (рисунок 1.20). При этом штамповка – сложный технологический процесс, связанный со значительными экономическими затратами на восстановление и замену штампов, а также на электроэнергию, потребляемую штамповочным прессом.

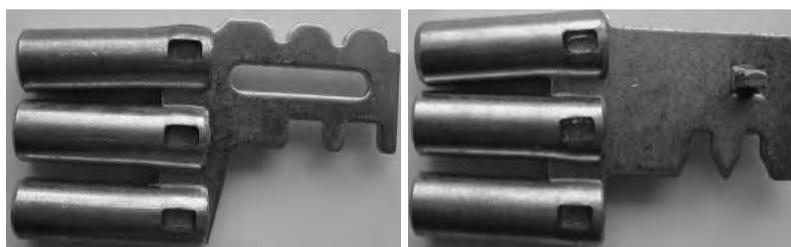


Рисунок 1.20 – Нарушение параллельности стержней при соединении засова замка способом штамповки

5 Соединения трех и более деталей на некоторых заводах осуществляют способами дуговой сварки. Сотни малогабаритных деталей типа гайка и болт приваривают к пластинам с отверстиями механизированной дуговой сваркой в защитных газах. При этом возникают трудности с обеспечением требуемых допусков размеров из-за пластических деформаций, которым подвержены детали в процессе протекания термического цикла дуговой сварки.

Отметим, что на практике при КРС соединений из двух деталей трудностей обычно не возникает. При КРС двух деталей чаще всего используют циклограммы с постоянным усилием сжатия электродов, с приложением ковочного усилия после выключения тока и с применением импульса подогрева [4, 27, 29].

Формирование многослойных соединений деталей при КРС, как и для соединений из двух деталей, неизбежно должно происходить за счет концентрации сварочного тока в местах соприкосновения деталей по поверхности, ограниченной рельефами. Точное размещение зоны сварки при этом определяется расположением рельефов или же естественной геометрической формой деталей. На производстве возможно использование при сварке рельефов круглой, прямоугольной, овальной, кольцевой и других форм. Изменяя форму и размеры рельефа, можно значительно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки, а следовательно, на прочность и качество многослойного соединения.

Обобщая вышесказанное, можно с уверенностью утверждать, что применение КРС при производстве многослойных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей позволит обеспечить их прочность и точность, а также решить некоторые из ранее указанных заводских проблем.

Исследованиями КРС многослойных соединений занимались В. А. Гилевич [27], М. Липа и Я. Голасек [42], А. И. Гуляев [2], Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров [55], Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев [1], П. Л. Чулошников [37] и др. При этом Гилевич, Липа и Голасек предлагали сваривать многослойные соединения КРС по схемам плоская деталь–стержень–плоская деталь, стержень–плоская деталь–стержень, а также пакеты из трех и более пластин, пакеты из трех и более стержней. Это объяснялось широкой распространенностью данных соединений на заводах по производству железобетонных конструкций, магнитопроводов трансформаторов, электротехнических заготовок и др.

В свою очередь выражались сомнения в возможности осуществления качественной КРС многослойных соединений ввиду особенностей геометрии сварных соединений, условий протекания сварочного тока через заготовки и распределения теплоты в зоне сварки [2, 55]. На практике такие соединения исследовались в [42], однако более точных подтверждений тех или иных



предположений касательно КРС многослойных соединений в дальнейшем получено не было.

Следует отметить, что исследования процесса КРС многослойных соединений пакетов электротехнических сталей при производстве деталей трансформаторных подстанций проводились еще с 1975 г. в Институте электро-сварки им. Е. О. Патона [56]. Исследования носили практический прикладной характер и заключались в экспериментальном подборе оптимальных параметров режима КРС указанных пакетов.

Имеются данные об исследовании КТС пакетов из легированной стали 12Х18Н10Т на кафедре сварки Пермского государственного технического университета [57].

Из зарубежных исследований следует отметить КТС пакетов по схеме 1 + 2 + 3 мм деталей двигателя автомобиля Hyundai Equus из алюминиевого сплава АМгЗ (Осло, Норвегия). В данной работе подбирались оптимальные параметры режима КТС, обеспечивающие формирование многослойного соединения по схеме с последовательным образованием литых зон (см. рисунок 1.16, а) [58].

Однако в зарубежных литературных источниках отсутствует информация об исследовании КРС многослойных соединений из низкоуглеродистой и низколегированной сталей, а в отечественных литературных источниках данный вопрос подробно не описан.

На сегодняшний день в Беларуси на заводах по производству железобетона имеется необходимость в качественной сварке многослойных соединений арматуры, откидных болтов для арматурной сетки и др., так как существующие заводские способы и техпроцессы контактной сварки не позволяют получить по-настоящему качественное конкурентоспособное изделие. Основываясь на общепризнанном факте, что рельефные сварные соединения двух заготовок уже на начальных стадиях формирования имеют значительно большую прочность по сравнению с точечными, можно с уверенностью утверждать, что многослойное рельефное сварное соединение должно обладать более стабильными прочностными характеристиками по сравнению с точечной сваркой. При этом полное проплавление деталей пакета при КРС может и не требоваться [27].

1.5 О необходимости математического моделирования термдеформационных циклов сварки

При КТС и КРС соединений протекают сложные взаимосвязанные термдеформационные процессы. Выделение джоулевой теплоты в металле при формировании рельефно-сварного соединения идёт при изменяющихся параметрах сварочного тока $I_{СВ}$, сопротивления $r_{ЭЭ}$ и напряжения $u_{ЭЭ}$ межэлектродной зоны [1, 2, 4, 27]. Ввиду более высокой, чем при других способах



контактной сварки, концентрации сварочного тока в зоне рельефа, зона термического влияния в околошовной зоне значительно уменьшается, что позволяет более эффективно использовать выделяющуюся теплоту на формирование непосредственно самого соединения. Близлежащие слои холодного металла при этом более эффективно уплотняют зону литого металла. Однако из-за малых размеров зоны соединения и незначительной продолжительности нагрева внутренними источниками теплоты возникают сложности экспериментального определения теплового состояния металла в процессе сварки.

Для всестороннего исследования процесса КРС необходимо моделирование процессов термоупругопластического деформирования металла зоны соединения, которое позволит установить зависимости между изменением основных параметров режима сварки и величинами деформаций в изменяющемся температурном поле межэлектродной зоны, а также даст возможность определить наиболее приемлемую форму введения электрической энергии в зону формирования соединения.

Процесс КРС является трудноанализируемым по причине наличия динамики теплового потока, изменения плотности электрического тока и свойств материала в зависимости от температуры.

Оценку теплового состояния металла при контактной сварке производят с помощью конечно-элементного моделирования, что позволяет работать с имитационной копией реального объекта, прогнозировать его функциональность и оценивать качественные показатели, одновременно сводя к минимуму натурные испытания.

Методики моделирования термомодеформационного цикла КТС соединений двух деталей представлены В. А. Ерофеевым, В. А. Судником в [59], А. С. Куркиным, С. Н. Киселевым в [60], С. Н. Козловским, Б. Д. Орловым в [61], А. Н. Прохоровым, А. А. Чакалевым в [62, 63], В. П. Березиенко, В. А. Попковским в [29, 40].

Многие авторы за рубежом использовали пошагово-совмещенные модели процесса КТС с целью изучения различных аспектов формирования соединений. Среди них Н. Нuh, W. Kang [64], Н. А. Nied [65], М. V. Li, P. Dong, М. Kimchi [66], X. Sun [67], W. Eagar, M. Calva [68], Z. Feng, J. E. Gould [69] и др.

Математическое моделирование процесса КРС является перспективным направлением в оптимизации формы и размеров рельефов, параметров режима сварки. Исследования в данной области требуют решать проблемы, связанные с необходимостью анализа совмещенной электротермомодеформационной задачи с учетом быстропротекающих пластических деформаций, которым подвергается зона сварного соединения в процессе осадки рельефа. Подобная интенсивная локализованная деформация вызывает значительные трудности в достижении сходимости вычислительного процесса, приводит к недопустимым искажениям



конечно-элементной сетки модели и, как следствие, преждевременному вынужденному окончанию расчета.

Математическая модель процесса рельефной сварки должна учитывать с большой степенью приближения такие существенные факторы, оказывающие непосредственное влияние на процесс сварки, как изменение размеров и формы контактной поверхности при осадке рельефа, перераспределение плотности тока и контактных давлений в процессе протекания сварочного тока, изменение теплового и электрического сопротивлений контактов и т. д.

С помощью данной модели требуется получить графическое решение задачи, из которого можно определить оптимальные параметры процесса сварки, размеры и форму литого ядра, направление линий тока и распределение температур, а также напряжения и деформации, возникающие в результате сжатия деталей электродами.

Моделирование процесса КРС с использованием пошагово-совмещенного анализа представлено в [70, 71], где был проведен комплексный термоэлектро-механический анализ для количественной имитации рельефной сварки. Основной областью применения математической модели является оптимизация следующих параметров режима сварки: размеров применяемых рельефов, величины сварочного тока и длительности его протекания, величины усилия сжатия электродов.

По сравнению с имитацией процесса точечной сварки рельефная сварка предполагает большую пластическую деформацию свариваемой детали в области рельефа, и поэтому анализ должен быть действительно «совмещен» в том смысле, что деформированная форма и площадь рельефа, а также информация о контактах должны обновляться. Изменение площади контакта из-за деформации рельефа играет решающую роль в процессе формирования литого ядра.

Если усилие сжатия электродов слишком малое или используется чрезмерный сварочный ток, происходит интенсивное плавление металла и, как следствие, выплеск и быстрая осадка рельефа. С другой стороны, если усилие сжатия электродов слишком высокое, преждевременная осадка рельефа может привести к значительному увеличению площади контакта, уменьшить плотность тока в зоне сварки и замедлить формирование литого ядра. Таким образом, должен соблюдаться динамический баланс деформации рельефа и тепловыделения.

Следует отметить, что из-за большой деформации в процессе моделирования для рельефной сварки сложнее получить сходимость решения по сравнению с точечной сваркой. Поэтому структура сетки конечных элементов имеет определяющее значение для достижения точности решения. Во многих случаях анализ прекращается, когда в процессе моделирования возникают трудности численного расчета, такие как начало выплеска. В экспериментальных или производственных условиях процесс сварки может продолжаться,

даже если существуют выплески. Однако наличие выплеска приведет к несогласованности качества и размера сварного шва.

С этой целью процедура пошагово-совмещенного термоэлектромеханического анализа может использоваться как инструмент прогнозирования оптимальных параметров режима сварки для конкретного типа рельефного соединения с целью обеспечения требуемых размеров литого ядра и качества сварного шва.

Следует отметить определенные трудности, возникающие при моделировании [70, 71]. Если задаваемое тепловложение слишком велико, а контактная поверхность слишком мала, то наблюдается расплавление и выдавливание металла из зоны контакта на периферию сварной точки. Когда это происходит, расчет прекращается из-за вычислительной проблемы, связанной с попыткой нахождения равновесия объема жидкого металла, имеющего очень низкую прочность. Кроме того, из-за большой пластической деформации металла зоны сварного соединения в процессе рельефной сварки трудно добиться стабильности процесса расчета и дискретность сетки разбиения конечно-элементной модели играет немалую роль в достижении точного решения.

Для количественного анализа рельефной сварки предлагается применять комплексный метод конечных элементов с использованием подпрограммы для связывания подмодулей электрического, теплового и механического анализа коммерческого пакета ANSYS [72]. Чтобы решить сложную взаимосвязанную задачу, обусловленную динамическими изменениями теплового потока и электрического тока, а также температурно-зависимыми свойствами материала, были учтены сведения о контактных поверхностях и геометрии области рельефа. Для моделирования рельефной сварки реализуется термомеханический связанный численный анализ с обновлением информации о параметрах в этих подмодулях инкрементным образом. Удовлетворительное согласование между экспериментальными и численными результатами указывает на то, что пошагово-связанный метод конечных элементов может быть использован для исследований рельефной сварки.

Программа ANSYS является одним из самых распространенных комплексов автоматического инженерного анализа (CAE – Computer Aids Engineering) с использованием метода конечных элементов. Она позволяет не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения напряжений, температур, скоростей, электромагнитных полей, а также провести моделирование осесимметричных контактных задач [73–75].

Моделирование контактной точечной и рельефной сварки с использованием ANSYS позволяет рассчитать температуру, напряжения и деформации, перемещение подвижного электрода в процессе сварки при протекании электрического тока и приложении механической нагрузки к электродам. При



этом моделирование осесимметричной контактной задачи должно базироваться на задании электрической проводимости и теплопроводности контактов, зависящих от температуры, давления, удельного электросопротивления и других теплофизических свойств материалов.

В продолжение данных исследований на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Белорусско-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев) были проведены исследования процесса КРС нахлесточных и Т-образных соединений, отображенные совместно с В. П. Березиенко, Т. И. Бендик в [76–81], на основании чего была разработана методика моделирования процесса КРС с использованием сферических рельефов, которая позволила устранить многие недостатки предыдущих моделей и дополнить их.

Для моделирования сварочных процессов методом конечных элементов (МКЭ) был применён программный пакет общего назначения MSC.Marc, обладающий рядом возможностей для моделирования процессов контактной сварки: осуществление совмещенного электротепломеханического анализа без необходимости вмешательства пользователя в процесс расчета, адаптация сетки конечных элементов модели, наличие расширенной библиотеки элементов (более 130 типов), позволяющей создавать любую геометрию моделируемого объекта, расширенные опции для задания контактных поверхностей, коэффициентов электро- и теплопроводности между контактирующими поверхностями, а также учёт скрытой теплоты фазовых переходов при плавлении металла и т. д.

Разработанная модель процесса КРС двух листов из низкоуглеродистой стали с выштампованными рельефами сферической формы применялась для исследования влияния параметров режима сварки на процесс образования сварного соединения [76]. Были определены основные параметры режима сварки и условия получения качественного соединения с образованием литого ядра заданных размеров для различных толщин свариваемых деталей (рисунок 1.21).

В расчетах учитывались теплофизические и механические свойства, зависящие от температуры и структурных превращений. Однако высокотемпературные (примерно от 1000 К и до температуры плавления) механические свойства (предел текучести, модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения) задавались исходя из условий сходимости вычислительного процесса.

Основная сложность численной реализации математических моделей процесса рельефной сварки Т-образных соединений заключается в том, что геометрия математической модели в локальной зоне деформации рельефа подвергается значительной пластической деформации [77, 78, 81]. Конечные элементы, составляющие рельеф, как правило, должны полностью вытесняться



из зоны сварки. В процессе расчета при подобных узловых перемещениях площадь конечного элемента становится практически равной нулю. Это приводит к недопустимым искажениям конечно-элементной сетки модели, неблагоприятно влияет на точность решения и является основной причиной преждевременного вынужденного окончания расчета.

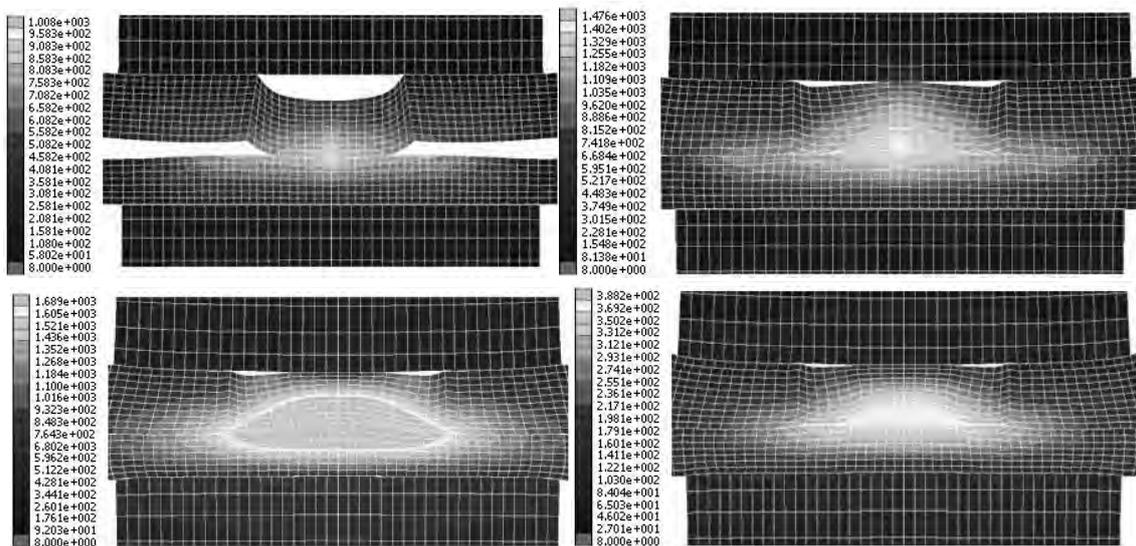


Рисунок 1.21 – Результат математического моделирования процесса контактной рельефной сварки в программном комплексе MSC.Marc

Программные пакеты общего назначения (ANSYS, COSMOS, MSC.MARC, NASTRAN и др.), обладая многими возможностями, создают значительные трудности при их применении к процессам контактной сварки, так как при плавлении металла возникает жидкая фаза, применительно к которой требуются совершенно другие методы расчета.

Поэтому развиваются специализированные программные продукты для моделирования процессов сварки с возможностью модернизации методик моделирования и расчётов. Среди современных программных продуктов, подходящих для моделирования рельефной сварки, можно выделить следующие: SysWeld, MSC Software Marc 2017, Simufact.Welding 6, ANSYS+LS-DYNA, COMSOL Multiphysics, ABAQUS и SORPAS [82–84].

SYSWELD – комплекс программ, содержащий несколько модулей:

- Welding Wizard – моделирует все физические процессы, происходящие во время сварки;
- Heat treatment – моделирует все физические процессы, происходящие во время термообработки;
- Sysweld Assembly – модуль сборки, используемый для моделирования сборки и сварки больших конструкций.

Система MSC.Marc позволяет проводить комплексный анализ поведения конструкций под влиянием различных нагрузок. В процессе нагружения конструкция может испытывать большие перемещения и деформации, материалы могут проявлять свои нелинейные свойства. В расчёте учитывается история нагружений, а также сложное контактное взаимодействие.

Simufact.Welding позволяет моделировать различные способы сварки, исследовать поведение сварных конструкций и процессов при сварке. В последней версии продукта добавлены и реализованы модули для расчёта, моделирования и анализа процессов контактной сварки.

Для моделирования процесса КРС использование механического анализа ANSYS ограничено, в этом случае больше подходит технология LS-DYNA. Она представляет собой мощный инструмент для решения разного рода задач. Технология даёт возможность выбрать самый широкий набор контактов, а также может автоматически создавать контактные поверхности в процессе расчёта. LS-DYNA позволяет решать задачи, которые требуют параллельного вычисления в процессе совмещённого расчёта.

С помощью пакета COMSOL Multiphysics и его многочисленных решателей-модулей можно моделировать практически все физические процессы, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, генерировать адаптивную сетку, выполнять линейные, нелинейные расчёты и комплексный анализ физической модели.

Программа SORPAS, в отличие от компьютерных программ конечных элементов общего назначения, является специализированным программным обеспечением, предназначенным для моделирования и оптимизации процессов контактной сварки. Она была разработана в 1990-е гг. в Техническом университете Дании для решения двумерных 2D промышленных задач и развивается благодаря датской компании SWANTEC Software and Engineering [85, 86].

Компьютерная программа SORPAS содержит специальные численные модули для моделирования контактной сварки. Она позволяет выполнять численное моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекание металлургических реакций, анализ электрических полей, деформацию конструкции и развитие в ней напряжений под воздействием нагрузок. Преимуществами электротермомеханического анализа в SORPAS являются точное моделирование площади контактов и распределения контактного давления, фазовых превращений, прогнозирование твердости и, как следствие, прочности материала в околошовной зоне, что даёт возможность расширить моделирование до испытаний на растяжение и разрушение после сварки, результаты которых используются для оценки общего качества и прочности полученных сварных точек.

Проведенный анализ показал, что применение компьютерных технологий в сварочном производстве на современном этапе развития технологического



прогресса носит глубокий характер. В настоящее время совершенно очевидно, что только использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки путем моделирования совокупности протекающих в металле процессов позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.

Следует отметить, что в последнее время развитие программных средств моделирования сварочных процессов привело к становлению новой области знаний, посвященной компьютерным технологиям в сварке. Универсальные программные продукты (ANSYS, MARC и др.) позволяют выполнять численное моделирование сварочных процессов на базе фундаментальных физических законов путем решения системы дифференциальных уравнений с использованием конечно-элементной модели объекта.

Однако именно в силу своей универсальности данные системы требуют дополнительной квалификации пользователя для учета специфики сварочных задач (одновременное протекание нескольких взаимосвязанных процессов). При работе с такими программными продуктами необходимы тщательная подготовка большого количества исходных данных, умение правильно выбрать схему дискретизации объекта и организовать процедуру анализа, а в некоторых случаях – разработка собственных программных модулей и их включение в систему для реализации особых схем анализа (например, организация совместного решения связанных задач).

1.6 Анализ существующих систем автоматического регулирования мощности и энергии тепловложения при контактной сварке

Существующие системы автоматического регулирования процесса контактной сварки различаются в зависимости от параметров регулирования и алгоритма управления [54].

Электрическими параметрами регулирования являются: ток сварки I_2 ; напряжение между электродами $U_{\text{ЭЭ}}$; сопротивление участка электрод–электрод $R_{\text{ЭЭ}}$; мощность $P_{\text{ЭЭ}}$ и энергия $Q_{\text{ЭЭ}}$ тепловложения.

По принципу действия алгоритма управления системы автоматического регулирования контактной сваркой делятся на две большие группы:

1) стабилизирующие системы, где происходит поддержание величины выбранного параметра (или группы параметров) около заданного значения, т. е. стабилизация условий сварки;

2) корректирующие системы, в которых с учетом измеренной величины контролируемого параметра определяется необходимое для компенсации изменение режима сварки.



По управляющему воздействию системы управления в основном разделяются в зависимости от управляемой величины: угла α открытия сварочных тиристоров или длительности $\tau_{\text{СВ}}$ протекания сварочного тока.

Системы стабилизации текущего значения при контактной сварке в большинстве случаев поддерживают неизменным действующее значение сварочного тока за счет жесткой стабилизации по обратной связи [22, 87].

Параметрическая стабилизация заключается в поддержании значения тока при колебаниях сетевого напряжения. В этом случае в качестве параметра обратной связи используется не ток, а сетевое напряжение.

Стабилизирующие системы активного контроля прекращают процесс сварки по достижении определенными параметрами наперед заданного значения. Такими параметрами могут быть интегралы от тока или напряжения, суммарное значение энергии, выделяемой в сварочном контакте, заданное перемещение подвижного электрода и т. д. [54].

Корректирующие системы управления контактной сваркой в основном работают по жесткому алгоритму, напоминающему алгоритм работы следящих систем. В корректирующих системах возможна стабилизация скорости нарастания теплосодержания зоны сварки [54, 88, 89]. В этом случае процесс осуществляется таким образом, чтобы изменение во времени контролируемого параметра соответствовало некоторой «идеальной» кривой, которую снимают в эталонных условиях сварки, при отсутствии возмущений. Параметры обратных связей должны быть достаточно чувствительны к возмущениям. Однако жесткий алгоритм компенсации не всегда дает желаемые результаты. Поэтому наиболее эффективными будут те системы, которые адаптируются к различным ситуациям и способны изменять не только параметры закона, но и сам закон управления. В настоящее время необходимость появления таких систем управления диктуется роботизацией контактной сварки, где требуется технологическая адаптация для обеспечения устойчивости безлюдной технологии.

В отношении качества сварки представляют практический интерес регистрация и измерение мощности, выделяющейся в свариваемом соединении. Для измерения этого параметра недостаточно иметь только информацию о сварочном токе. Надо либо знать значение и характер изменения сопротивления участка электрод–электрод, либо иметь информацию о падении напряжения на данном участке. Мощность тепловложения в свариваемые детали достаточно полно характеризует протекание процесса сварки и позволяет прогнозировать качество выполняемого соединения.

В качестве датчика мощности может применяться полупроводниковый датчик Холла. Если цепь тока датчика питать падением напряжения $u_{\text{ЭЭ}}$ на свариваемых деталях при прохождении сварочного тока $i_{\text{СВ}}$ и поместить датчик в магнитное поле сварочного контура, то ЭДС Холла будет



пропорциональна произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. мгновенному значению мощности, выделяемой при сварке [22, 90]:

$$E_x = k \cdot i \cdot H = k \frac{u_{\text{ЭЭ}}}{R} k_1 i_{\text{СВ}} = k_2 i_{\text{СВ}} u_{\text{ЭЭ}} = k_2 P_{\text{ЭЭ}}, \quad (1.8)$$

где i – ток питания датчика Холла;

R – сопротивление в цепи тока питания датчика;

$i_{\text{СВ}}, u_{\text{ЭЭ}}, P_{\text{ЭЭ}}$ – мгновенные значения сварочного тока, падения напряжения между электродами и мощности тепловложения соответственно;

k, k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности;

H – напряженность магнитного поля сварочного контура.

При наличии сварочного тока на выходе датчика возникает величина, пропорциональная произведению мгновенных значений сварочного тока $i(\tau)$ и вторичного напряжения $u(\tau)$ машины. Интегрирующий усилитель преобразует сигнал датчика в величину, пропорциональную активной мощности P на сварочном участке электрод–электрод

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(\tau) \cdot i(\tau) \cdot d\tau, \quad (1.9)$$

где T – период сварочного тока;

τ – время протекания процесса.

В связи с тем, что измерение мощности и энергии на сварочном участке электрод–электрод затрудняется необходимостью измерения падения напряжения на электродах сварочной машины, при разработке регуляторов контактной сварки часто идут на некоторое упрощение и применяют регулирование по функционалу сварочного тока [22]

$$C = \int_0^{\tau_{\text{СВ}}} i_{\text{СВ}}^2 d\tau = A(d_{\text{ЭЛ}} + k\delta)^4, \quad (1.10)$$

где $\tau_{\text{СВ}}$ – время протекания сварочного тока;

A и k – коэффициенты, определяемые теплофизическими свойствами материала, т. е. маркой материала;

$d_{\text{ЭЛ}}$ – диаметр контактной поверхности сварочного электрода;

δ – толщина свариваемого материала.

Примером регулятора контактной сварки, работающего по принципу стабилизации параметра C , является устройство активного контроля типа УАК-02. Таким устройством оснащаются машины МТ-2828. Центральным звеном



устройства является микроЭВМ «Электроника С5-12», которая выполняет функции восьмипозиционного регулятора цикла сварки с широкими возможностями управления током и усилием сжатия аналогично регулятору РВИ-801 [22].

С началом сварки микроЭВМ считывает в каждом периоде действующее значение сварочного тока и накапливает величину

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i^2 \Delta\tau, \quad (1.11)$$

где n – количество прошедших периодов сварки;

I_i – действующее значение тока в i -м периоде;

$\Delta\tau$ – период сетевого напряжения, $\Delta\tau = 0,02$ с.

Когда сумма превысит подсчитанное значение контролируемого параметра C_{Σ} , подается сигнал на выключение сварочного тока. Предварительное время сварки устанавливается с некоторым рациональным запасом. Если в течение этого времени параметр C_{Σ} не будет достигнут, устройство подаст сигнал «Ток мал» о необходимости увеличения сварочного тока за счет «нагрева» или изменения ступени.

В сочетании с параметрической стабилизацией сварочного тока и автоматизацией расчета заданного значения функционала такой способ управления дает значительный выигрыш в производительности и качестве сварки.

Развитием систем активного контроля по функционалам сварочного тока являются системы, использующие в качестве параметра обратной связи энергию, выделяемую в сварочном промежутке [91–94]. В таких системах происходит замер мгновенных значений сварочного тока и напряжения между электродами и деталями, интегрирование произведения этих величин и сравнение полученных значений с заданными.

Функционал сварочного тока может быть использован и в корректирующих системах, когда угол открытия тиристоров в следующем периоде вычисляется в соответствии с накопленной величиной C_{Σ} [95].

Для диагностики выделяемой при сварке энергии возможно использование комплексных параметров, учитывающих тепловой баланс контактной сварки. Например, таким параметром может являться величина

$$P = I_2^{1-k} U_{\text{ЭЭ}}^{1+k}, \quad (1.12)$$

где I_2 – сварочный ток;

$U_{\text{ЭЭ}}$ – напряжение между сварочными электродами;

k – коэффициент режима стабилизации, равный $0,1 \dots 0,6$ [96].

Повышение требований к качеству сварных соединений заставляет производить контроль одновременно нескольких параметров (например, свароч-



ного тока и падения напряжения на участке электрод–электрод), что делает систему управления более подверженной влиянию помех, значительно ограничивающих точность измерений и снижающих качество управления сваркой. Поэтому разработка систем управления контактной сваркой на базе компьютерного и микропроцессорного управления, осуществляющих стабилизацию процесса по вложению тепла в сварную точку на основании исследований взаимосвязи тепловых и электрических процессов, протекающих при контактной сварке, позволяет минимизировать количество измеряемых параметров. Например, информация об электрических параметрах вторичного контура (активном и индуктивном сопротивлениях в режиме короткого замыкания) даёт возможность в процессе сварки измерять только одну величину – вторичный ток или напряжение на электродах [97, 98].

Одной из трудностей, возникающих при реализации предложенных способов, является то, что в формировании сварной точки используется не вся энергия, выделяемая на участке электрод–электрод. Значительная ее часть теряется на нагрев электродов и основного металла, причем доля потерь в начале и конце каждого полупериода протекания сварочного тока существенно возрастает. В результате этого на режимах с отличающейся жесткостью (длительностью импульса сварки) возможны различные оптимальные значения выделяемой при сварке энергии.

Повышение точности измерения энергии, определяющей размеры сварного соединения, улучшает в конечном счете точность контроля и управления по величине энергии, выделяемой в сварочном контакте. Для решения данной проблемы предлагается, например, для машин переменного тока интегрирование начинать не в начале и заканчивать в конце каждого полупериода сварочного тока, а при достижении сварочным током 10 % от его максимального значения [99].

Для задания эталонной величины энергии тепловложения $Q_{ЭЭ}$ на участке электрод–электрод и получения качественного соединения в некоторых случаях используют эмпирические зависимости [100]. Основная трудность применения данных уравнений состоит в сложности определения коэффициентов, зависящих от свойств свариваемых материалов.

В работах, посвященных исследованию вопросов регулирования параметров режима и стабилизации процессов контактной сварки, подчеркивается сложность создания и реализации систем автоматического регулирования мощности и энергии тепловложения в зону соединения [22, 101]. В этом направлении уже получен определенный результат: предложены системы стабилизации тепловыделения в сварочном контакте, в основе которой лежит анализ характеристик первичного и вторичного контуров сварочной машины (активное и индуктивное сопротивления вторичного контура сварочной

машины, длительность включенного состояния тиристоров, коэффициент мощности и др.) [54, 92, 102].

В качестве обратной связи при регулировании мощности тепловложения при контактной точечной сварке также используют величину и скорость перемещения подвижного электрода, которые имеют определенную взаимосвязь с диаметром ядра сварной точки [103–109].

Системы автоматического управления, использующие в качестве параметра обратной связи перемещение электрода, могут быть как активного контроля, так и корректирующие. При этом в качестве сигнала обратной связи может быть использовано как осевое перемещение электрода в процессе сварки [102, 103, 110], так и скорость или ускорение при осевом перемещении [111, 112].

В системах активного контроля происходит отключение сварочного тока в момент достижения контролируемым параметром (линейного перемещения электродов, скорости, ускорения или интегральных величин) заданного значения. На рисунке 1.22 показана структурная схема системы активного контроля КТС по перемещению подвижного электрода [104].

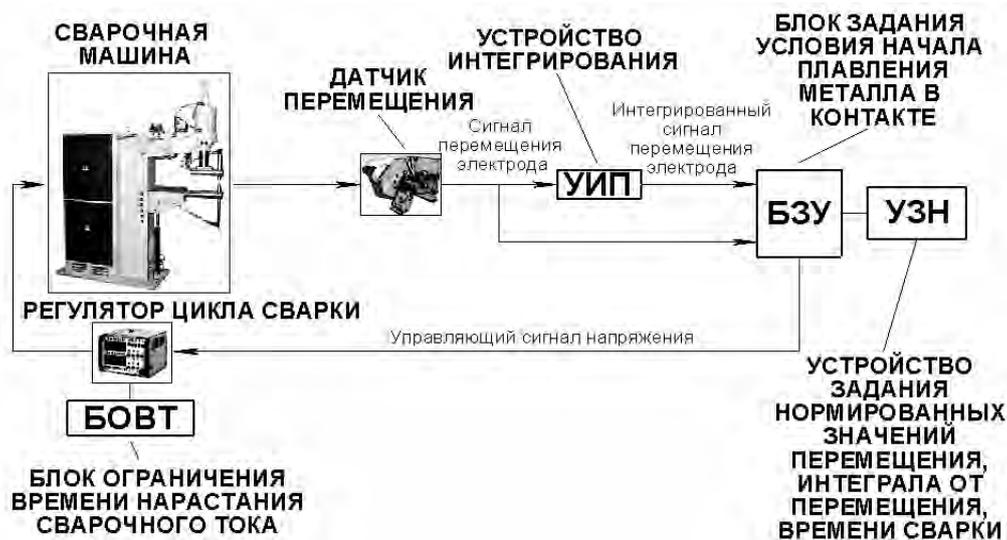


Рисунок 1.22 – Структурная схема системы активного контроля процесса контактной точечной сварки по перемещению электрода

Во время нарастания импульса тока измеряют перемещение подвижного электрода, интегрируют его величину и тем самым определяют контролируемый параметр, после чего сравнивают его с заданным значением. По достижении контролируемым параметром заданного значения, определяемого из условия начала плавления металла в свариваемом контакте, сварочный ток прекращают увеличивать и далее до конца процесса его величину не изменяют, а по достижении контролируемым параметром заданного значения, определяемого из условия достижения диаметром ядра требуемых размеров, выключают сварочный ток [104].

В корректирующих системах регулирование тока сварки осуществляется в зависимости от различных измеренных статических и динамических характеристик перемещения электрода. При этом управление сварочным током и усилием сжатия производится таким образом, чтобы перемещение подвижного электрода приближалось к «идеальной» кривой, свойственной данному режиму сварки [113–118].

Корректирующая система управления по перемещению электрода включает в себя два контура (рисунок 1.23). Во внешний контур входят задатчик перемещения электрода 1, узел сравнения 2, преобразователь сигнала перемещения 3 и датчик перемещений ДП. На узел сравнения 2 поступают сигналы $\Delta_{\text{зад}}$ с выхода задатчика 1 и $\Delta_{\text{изм}}$ от преобразователя сигнала перемещения 3. Внутренний контур обеспечивает поддержание заданного значения тока $I_{2,\text{зад}}$ и включает в себя задатчик тока 4, узел сравнения 5 заданного $I_{2,\text{зад}}$ и измеренного $I_{2,\text{изм}}$ токов, преобразователь сигнала тока 6 и датчик тока ДТ [54].

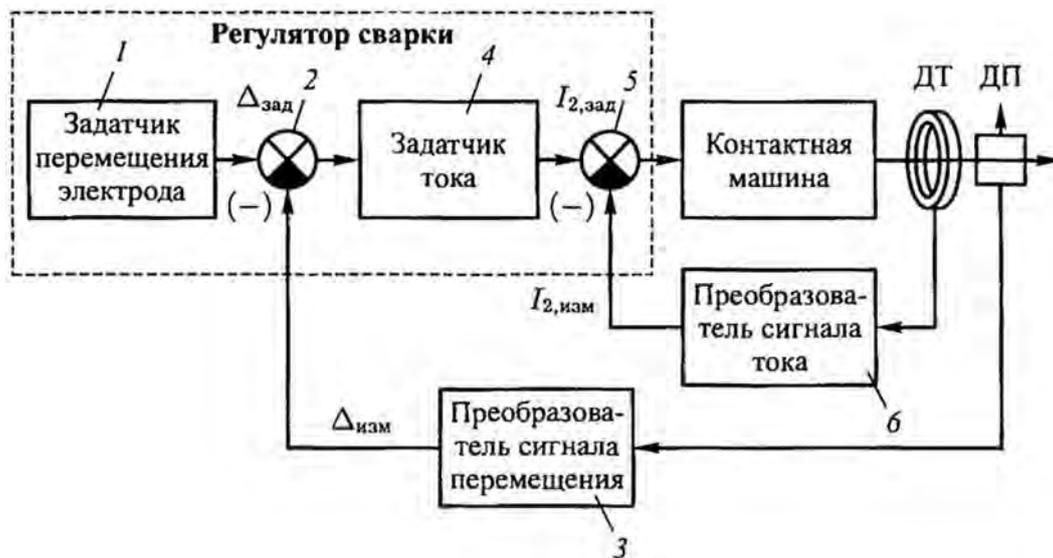


Рисунок 1.23 – Структура корректирующей системы управления по перемещению электрода

Одной из трудностей, возникающей при контроле контактной точечной сварки по перемещению подвижного электрода, является появление выплеска расплавленного металла, в результате чего перемещение подвижного электрода значительно отклоняется от заданной «идеальной» кривой. Поэтому в процессе сварки для эффективного контроля выплески должны быть полностью исключены.

Другой трудностью является снижение точности замера вследствие прогиба консоли, крепящей неподвижный электрод. Для учета этого необходимо, чтобы датчик перемещения располагался как можно ближе к оси электродов и закреплялся между подвижной и неподвижной консолями.

Недостатком всех способов контроля качества контактной точечной сварки по перемещению является значительное снижение точности вследствие возникновения дополнительной составляющей ускорения подвижного электрода от электродинамических сил во вторичном контуре [54].

Также недостатком данного способа контроля точечной сварки является то, что при уменьшении толщины свариваемых деталей измерение перемещения подвижного электрода затрудняется, так как его значение уменьшается пропорционально толщине деталей. Поэтому при сварке деталей средних толщин рационально измерять скорость перемещения подвижного электрода, а при сварке деталей малых толщин – линейное ускорение перемещения подвижного электрода, а затем интегрировать и тем самым определять контролируемые параметры, пропорциональные перемещению подвижного электрода и интегралу от текущего его значения.

В связи с этим наиболее актуально использовать величину и скорость перемещения электрода в качестве обратной связи при регулировании мощности тепловложения в процессе рельефной сварки, так как данные величины в первую очередь определяются геометрией рельефа и оказываются существенно большими, чем при точечной сварке.

При проведении исследований в области контактной сварки, разработке новых систем автоматического управления, выборе оптимальных режимов сварки и решении других научных и технологических задач целесообразно использовать компьютерное управление контактной сваркой. Современные программируемые промышленные контроллеры автоматизации в связке с персональной ЭВМ позволяют на сегодняшний день не только реализовывать различные алгоритмы управления и производить детальную запись основных параметров, характеризующих процесс сварки, с их последующим анализом, но и автоматически воздействовать на быстропротекающие процессы контактной сварки.

Так, например, микроЭВМ может использоваться для предварительной оценки сечения контактного пятна после сжатия сварочных клещей путем пропускания стабилизированного тока силой 200...1000 А в течение 5...10 полупериодов [119]. В зависимости от значения падения напряжения на сварочных электродах микроЭВМ подает сигнал либо на «запрет», либо на «включение» сварки. При включении сварки микроЭВМ с помощью блока измерения измеряет в конце каждого полупериода действующие значения тока и напряжения. Измеренное значение тока сравнивается с заданным и в зависимости от величины ошибки микроЭВМ рассчитывает и корректирует угол открытия тиристорных контакторов сварочной машины. После окончания сварки микроЭВМ вычисляет интегральную (суммарную) ошибку стабилизации сварочного тока за все время сварки. Сравнением вычисленных величин с допустимыми значениями определяется качество сварного соединения. В том случае, когда микроЭВМ определяет данное сварное соединение как

некачественное, процесс сварки приостанавливается для оперативного внесения изменений в режимы сварки: изменение усилия сжатия клещей, замена изношенных деталей, изменение заданного времени и действующего значения сварочного тока.

В [54, 98, 120] разработан специальный комплекс компьютерного управления контактной точечной сваркой, который позволяет осуществлять управление по заданному пользователем алгоритму и производить измерения основных параметров сварки. Использование предложенного комплекса даёт возможность сделать системы управления более универсальными, интенсифицировать научные исследования в области повышения качества и управления контактной сваркой, производить выбор оптимальных режимов и циклограмм сварки. Компьютерный комплекс, состоящий из персонального компьютера, блока цифрового ввода-вывода и блока согласования, работает так: в ЭВМ программно задаются параметры цикла по каждому каналу (импульсы синхронизации, соответствующие переходу сетевого напряжения через ноль; время и длительность включения электропневматических клапанов усилия сжатия и усилия проковки; время включения тиристоров с заданным углом фазового регулирования α). Затем для каждого последующего периода сетевого напряжения задается угол включения тиристоров в градусах. На положительной и отрицательной полуволнах формируется запускающий импульс с заданным для данного периода запаздыванием относительно фронта нарастания или спада синхроимпульсов, который подается на тиристорный контактор. При этом существует возможность управления действующим значением сварочного тока для каждого периода сетевого напряжения отдельно, что позволяет формировать любые циклограммы тока с нарастанием и спадом по определенному закону. Для измерения параметров тепловыделения при КТС на однофазных машинах переменного тока используется длительность λ импульса сварочного тока I_2 при заданном угле α его включения в каждом периоде сетевого напряжения. Данный способ измерения тепловыделения при КТС может быть применен при настройке контактной сварочной машины на оптимальные режимы, а также как дополнительный блок в системах автоматического управления процессом КТС [98].

В [121–123] разработана виртуальная технология для контактной сварки. Виртуальная технология – это экспертная программа для персонального компьютера, позволяющая выбрать для определенной марки материала, его толщины и состояния поверхности режимы сварки, тип сварочной машины, способ регулирования процесса, а также по математическим моделям оценить качество сварного соединения. Система управлением КСУ КС-02 была применена для управления циклом и контроля процесса сварки на стационарных и подвесных машинах переменного тока [121]. В портативной компьютерной системе для контактной точечной сварки КСУ КС-03

одновременно реализованы функции экспертной системы и функции контроля процесса сварки [123].

При контроле в процессе сварки сигналы со всех имеющихся датчиков поступают на измерительные преобразователи, затем воспринимаются аналого-цифровым преобразователем и посредством интерфейса выводятся на экран дисплея. Одновременно блок контроля с периодом 10 мс выдает интегральные значения тока, напряжения, усилия сжатия и ускорения электродов, по которым компьютер верхнего уровня рассчитывает входные параметры контроля, такие как ток, напряжение, перемещение электрода и сопротивление межэлектродной зоны в последнем периоде сварки; интегральные оценки погрешности обработки кривых тока, напряжения и перемещения; энергия, выделенная в сварочном контакте, и др. По встроенному алгоритму осуществляется сравнение фактических и требуемых показателей качества сварки, после чего на дисплее компьютера отображаются отклонения от требуемых режимов сварки. Все данные о процессе сварки сохраняются, на их основе выполняется статистический анализ производства.

Проведенный анализ систем автоматического регулирования показал, что персональная ЭВМ благодаря специальному программному обеспечению может эффективно использоваться для синтеза алгоритмов управления процессами контактной сварки и ускорения поиска оптимальных циклограмм и параметров режима в условиях производства. Поэтому дальнейшее совершенствование систем управления контактной сваркой является актуальным и может быть осуществлено в направлении поиска новых диагностических признаков и повышения стабильности работы таких систем, а также для получения наиболее достоверной картины формирования сварного соединения.

Выводы

В качестве совершенствования термомодеформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки приняты следующие направления.

1 При контактной точечной сварке значительному уменьшению степени пластической деформации лицевых поверхностей изделий способствует создание такого напряженно-деформированного состояния металла зоны соединения, которое препятствует деформации в радиальном и осевом направлениях и увеличивает сопротивление пластическому течению металла из зоны сварного соединения к периферии сварной точки. Поэтому способ сварки с регулируемым обжатием периферии сварной точки с помощью кольцевого пуансона нуждается в дальнейшем исследовании с целью создания циклограмм сварки и надежных и компактных электродных устройств для их реализации в серийном и массовом производстве.



2 При рельефной сварке Т-образных соединений, изменяя форму и размеры рельефа, можно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки. Электродная оснастка должна обеспечивать рациональный подвод тока к свариваемым деталям, тепловое равновесие в зоне соединения с целью предотвращения неравномерного нагрева свариваемых деталей. Однако отсутствие нормативной базы, устанавливающей требования к применяемым рельефам, вызывает трудности при выборе основных параметров режима сварки, а значит, и при прогнозировании геометрических характеристик и прочности сварных соединений.

3 Как основной инструмент для определения параметров режима рельефной сварки, обеспечивающих требуемые показатели качества соединений, выбрано детальное изучение кинетики формирования соединений с использованием математического моделирования процесса, которое позволит определить оптимальные законы регулирования, оказывающие влияние на работоспособность и точность геометрических параметров получаемых сварных соединений.

4 Снижению влияния человеческого фактора способствует применение систем автоматического регулирования, обеспечивающих стабильные результаты сварки на основе своевременного реагирования на возникновение недопустимых отклонений информативных параметров, по которым осуществляется активный контроль процессов сварки. Использование технических возможностей современной компьютерной техники для комплексного анализа технологических вариантов сварки позволит получать оптимальные технологические решения при значительном снижении ресурсоемкости самого процесса разработки.



2 Математическое моделирование процесса термоупругопластического деформирования металла зоны соединения при контактной точечной и рельефной сварке

2.1 Пошагово-совмещенная математическая модель термомодеформационного цикла сварки на основе метода конечных элементов

В отличие от других сварочных процессов, контактную точечную и рельефную сварку трудно контролировать непосредственно при росте сварного ядра, поскольку процессы плавления и кристаллизации в основном происходят между заготовками. Общей практикой является управление входными параметрами режима сварки и контроль выходных данных, тем не менее входные и выходные данные не дают полного представления о процессе формирования ядра. Поэтому в процессе сварки важен поиск характерных технологических сигналов как атрибутов качественного формирования соединения. Сложность контроля возрастает из-за взаимодействия электрических, термических, механических и металлургических процессов. В этой ситуации численное моделирование является мощным инструментом. Распределение температурных полей, напряжений и деформаций, а также признаки возникновения дефектов на разных этапах сварки могут быть выявлены путем численного моделирования. Жесткость конструкции сварочной машины и параметры процесса сварки, такие как усилие сжатия электродов, сварочный ток, могут варьироваться в процессе моделирования методом конечных элементов для изучения степени их влияния. Проведение подобного эксперимента было бы чрезвычайно сложно, если не невозможно.

Многие исследователи моделировали контактную точечную сварку (КТС) методом конечных элементов. Были предложены вычислительные модели для определения оптимальной области параметров сварки и прогнозирования качества процесса формирования шва, для изучения влияния термопластических свойств материалов на процесс формирования соединений, позволяющие снизить производственные затраты при исследовании и проектировании технологии КТС [124]. Например, коммерческий пакет моделирования конечных элементов ANSYS использовался для моделирования точечной сварки стали путем последовательного совмещения электрических и тепловых механических процессов [65, 125]. Некоторые работы посвящались моделированию КТС алюминия [67, 126], а также контактной рельефной сварки (КРС) [70–72].

Для точного моделирования структуры и свойств соединений требуется точное моделирование виртуального электротермомеханического процесса КТС. Зачастую это невозможно из-за отсутствия специального коммер-

ческого пакета программного обеспечения для сварки. В дополнение к недостаточной способности программ общего назначения рассчитывать сварочные процессы существенно затруднили прогресс в этом направлении температурные зависимости свойств материалов. Например, значительная вариация контактных сопротивлений во время сварки не может быть учтена из-за отсутствия данных и случайности процесса. Однако точность моделирования может быть улучшена за счет последних достижений при разработке программного обеспечения для методов численного моделирования. Более существенные результаты могут быть получены также в связи с научными открытиями при исследовании и испытании свойств материалов.

В последнее десятилетие коммерческий пакет ANSYS продемонстрировал свою универсальность в моделировании процессов контактной сварки, в частности, путем включения в расчет более реальных параметров и условий. Программный комплекс ANSYS относится к числу лидеров в области CAE-продуктов конечно-элементного анализа и имеет почти сорокалетний опыт в решении прикладных задач численными методами. В настоящее время данный комплекс охватывает практически все виды инженерного анализа: от механики деформируемого твердого тела и теплового анализа до гидродинамики и анализа процессов горения, взрыва, теплообмена и фазовых переходов, электродинамики.

Начиная с первых версий в ANSYS интенсивно развивалась внутренняя CAD-система проектирования, предоставляющая пользователю широкие возможности для создания, редактирования, управления геометрическими моделями. Кроме того, решалась проблема эффективной интеграции отдельных компонентов программы, программных кодов того или иного вида инженерного анализа в единую расчетную среду для раскрытия всех возможностей многодисциплинарного связанного анализа (пошагово-совмещенный расчёт).

Для геометрического моделирования в новую платформу ANSYS Workbench встроен модуль Design Modeler, реализованный на базе ядра Parasolid. Модуль симуляции Mechanical обеспечивает пользователя необходимыми инструментами моделирования. CAE-системы, приобретенные фирмой ANSYS Inc. за последние годы, такие как CFX, FLUENT, AUTODYN, LS-DYNA и др., удобно интегрированы в Workbench и могут использоваться для решения связанных задач. С помощью Workbench практически весь комплекс программных продуктов ANSYS может быть объединен с мощными CAD-системами, такими как SolidWorks, Unigraphics, Inventor и др., в единую расчетно-проектировочную среду. На базе Workbench реализованы инструменты для обмена и эффективного управления расчетными данными пользователей (ANSYS EKM).



Программа ANSYS, как и многие другие САЕ-продукты, для математического моделирования различных физических процессов использует метод конечных элементов. Этот метод сочетает в себе универсальность алгоритмов решения различных краевых задач с эффективностью компьютерной реализации вычислений.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет приближённо численно решать широкий спектр физических проблем, которые математически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. Этот метод можно использовать для анализа напряжённо-деформированного состояния конструкций, для термического анализа, для решения гидрогазодинамических задач и задач электродинамики. Могут решаться и многодисциплинарные связанные задачи, объединяющие все четыре типа, с возможностью реализации пошагово-совмещенного расчёта.

Исходным объектом для применения МКЭ является материальное тело (в общем случае – область, занимаемая сплошной средой или полем), которое разбивается на части – конечные элементы (рисунок 2.1). В результате разбивки создаётся сетка из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта.

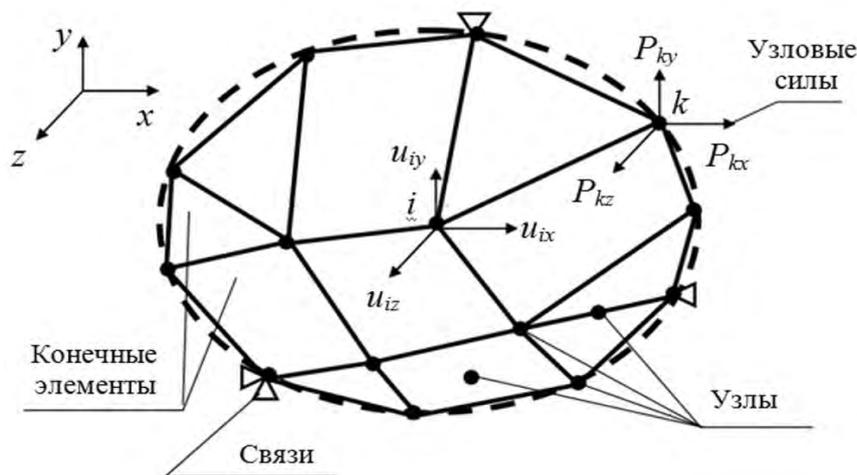


Рисунок 2.1 – Система конечных элементов

Выбор типа, формы и размера конечного элемента зависит от формы тела и вида напряжённо-деформированного состояния. Конечные элементы наделяются различными свойствами, которые задаются с помощью констант и опций. Все элементы и узлы нумеруются. Нумерация узлов бывает общей (глобальной) для всей конечно-элементной модели и местной (локальной) внутри элементов. Должны быть определены массивы связей между номерами элементов и общими номерами узлов, а также между местными и общими номерами узлов.

Для расчета полей различных физических величин с помощью МКЭ в рассматриваемой области необходимо определить материалы элементов и задать их свойства. В задачах деформирования прежде всего нужно указать упругие свойства – модуль упругости и коэффициент Пуассона. Если предполагается пластическое течение, то необходимо задать истинные диаграммы деформирования, которые аппроксимируются билинейными или мультилинейными кривыми. Когда тело неравномерно нагрето, вышеуказанные механические свойства требуется задать для ряда температур и, кроме того, нужно ввести коэффициент теплового расширения.

Общая система уравнений равновесия, полученная методом конечных элементов для статической линейно-упругой модели тела, является с математической точки зрения системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). После учета правильно наложенных связей, не допускающих движения модели как абсолютно твёрдого тела, определитель матрицы жёсткости $[K]$ не равен нулю и, следовательно, существует единственное решение – общий вектор узловых перемещений $\{U\}$.

Точность и эффективность различных способов решения СЛАУ во многом зависит от структуры и свойств матрицы $[K]$: размера, обусловленности, симметричности, заполненности и др. Известные алгоритмы решения СЛАУ можно разделить в основном на две группы: прямые методы и итерационные методы.

Прямые («точные») методы позволяют получать с помощью конечного числа операций точные значения неизвестных, если коэффициенты и правые части уравнений заданы точно и нет округлений при вычислениях. Среди множества прямых методов наибольшее применение имеют метод исключения неизвестных Гаусса, метод квадратного корня, а также их разновидности, в частности, фронтальный метод и схема разложения.

Итерационные методы характеризуются тем, что вначале задаются некоторые приближённые значения неизвестных. Затем с помощью каких-либо алгоритмов их последовательно уточняют, приближаясь к точному решению. Наиболее часто используются метод прямой итерации, метод Гаусса–Зейделя, метод последовательной верхней релаксации, градиентные методы наискорейшего спуска и сопряжённых градиентов.

Дифференциальные уравнения движения и дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности интегрируются различными численными методами. В результате находятся узловые перемещения или узловые температуры как функции времени. Через них определяются все другие искомые величины.

Хотя метод конечных элементов и обладает значительной гибкостью при моделировании процессов сварки, общие коммерческие пакеты не обеспечивают моделирования полностью связанных электрических, тепловых и



механических процессов. Поскольку реальные процессы при расчетах, по существу, разделены и взаимодействие между ними не учитывается, то и ошибки могут быть весомыми. История моделирования контактной сварки может быть охарактеризована степенью сцепления данных процессов в модели в разные периоды. Совершенствование расчетов связано с применением пошагово-совмещенного решения следующих задач: электрической, тепловой (для изучения электрических и температурных полей при сварке) и механической (для изучения характера упругопластического деформирования металла зоны сварки) [67, 69, 70, 72, 85, 127–129].

Слабосвязанное моделирование с помощью программы ANSYS используется для расчета в электротермическом анализе истории температуры, которая будет восприниматься в качестве тепловой нагрузки в последующем термомеханическом анализе. Электротермический анализ прерывается после небольшого приращения времени сварки. В электротермическом модуле через детали проходит электрический ток при постоянной механической нагрузке. Новое распределение температуры получается на основе предыдущего температурного поля и дополнительного тепловложения. Это новое температурное поле теперь накладывается на термомеханическую систему сопряжения, которая предоставляет информацию о геометрии, области контакта и т. д. Затем информация о поиске передается в электротермический модуль для следующего приращения нагрева. Повторением данной процедуры моделируется процесс формирования ядра, т. е. нагрев, плавление и охлаждение деталей. При этом нужно учитывать, что фактические области контактов электрод–деталь и деталь–деталь оказывают прямое влияние на плотность тока и нагрев, вследствие чего должна использоваться теория для предсказания изменения геометрии области контакта и его свойств в процессе сварки. Приращения времени должны быть четко заданы, при этом необходимо избегать неоправданно длительного времени выполнения отдельных шагов.

Идеальная и реалистичная модель процесса контактной сварки должна включать тщательный анализ теплопередачи, анализ электрического поля, термоупругопластический анализ, фактическое изменение контактного сопротивления, фазовые превращения и зависящие от температуры свойства материала. Наиболее сложный аспект моделирования связан с плавлением и кристаллизацией металлов.

Электрические, термические и механические процессы могут быть сформулированы отдельно, а затем связаны друг с другом. Однако удобно рассматривать электрические и тепловые процессы вместе, поскольку они непосредственно связаны между собой. Тогда связь с механическим процессом может быть реализована путем наложения тепловой нагрузки при анализе напряжений.



Согласно алгоритму процедуры пошагово-совмещенного расчета (рисунок 2.2) первый этап моделирования начинается с механического анализа при предварительном сжатии электродов и исходной температуре 20 °С, в результате которого получаем необходимые исходные данные для следующего этапа: статус начального контакта, контактное давление, упругие деформации электродов и деталей.

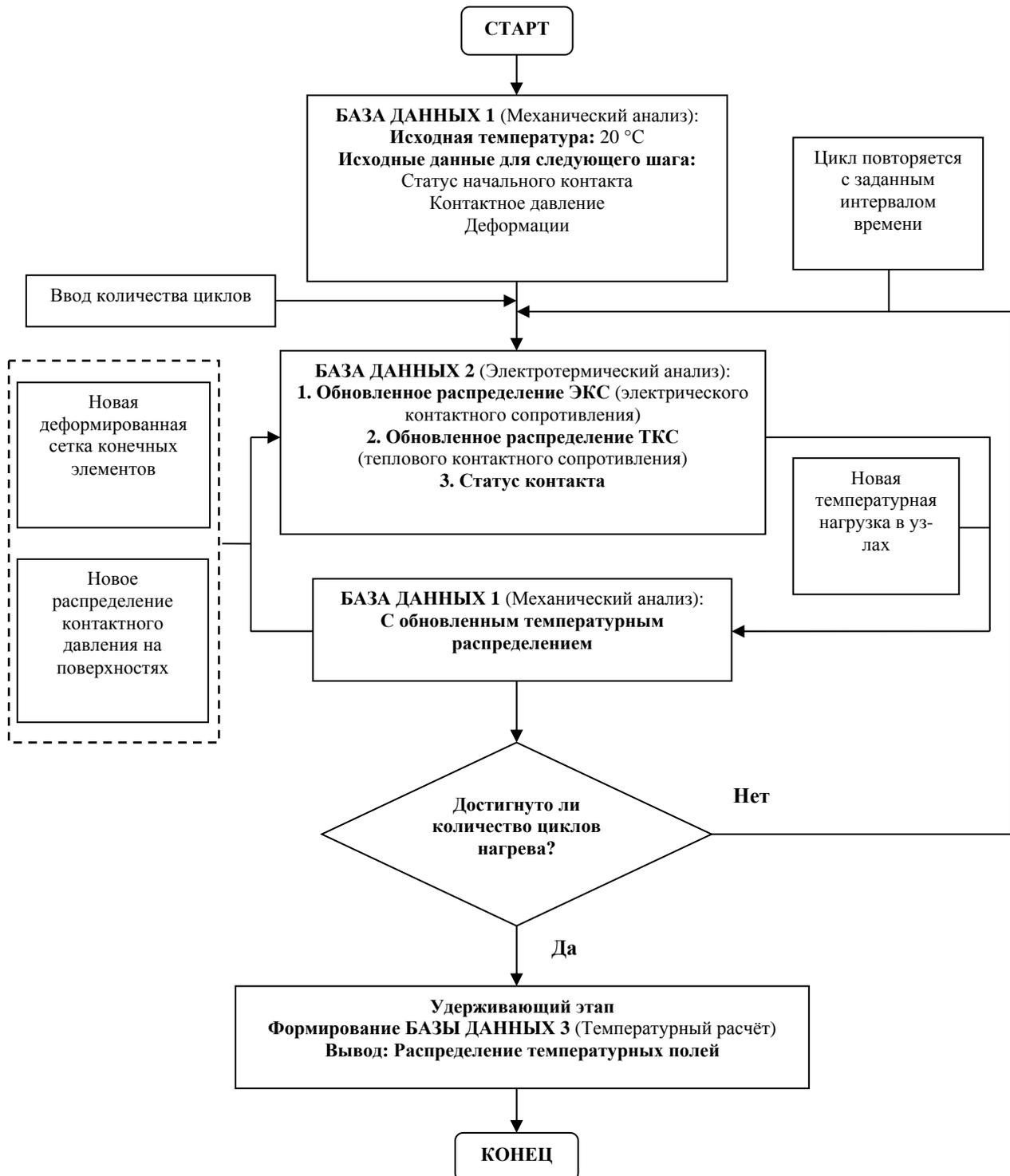


Рисунок 2.2 – Алгоритм процедуры пошагово-совмещенного расчета

Вторым этапом моделирования является электротермический анализ, в котором по закону Джоуля–Ленца рассчитывается величина тепловыделения от прохождения сварочного тока. В этом анализе важную роль играют электрическое и тепловое сопротивления контактов между электродами и деталями. Их можно рассчитывать с использованием искусственных контактных элементов, для которых задаются электротеплофизические свойства материала для решения задач электропроводности и теплопроводности с условием сходимости расчета при моделировании физических процессов.

Формирование электротермического процесса заключается в следующем:

- электрический потенциал, задаваемый для всей области, масштабируется в соответствии с заданным электрическим током и используется для расчета плотности тока с учетом площади контакта, электрических контактных сопротивлений и собственного электрического сопротивления материалов;
- тепловыделение при прохождении тока используется в качестве генерации тепла при расчете распределения температуры по уравнению теплопроводности;
- электротеплофизические свойства материала обновляются поэтапно в зависимости от рассчитанной температуры с учетом конвективного теплообмена с окружающей средой и водяного охлаждения электродов.

Выходными данными электротермического анализа являются обновленный статус контакта и новое распределение электрического и теплового контактных сопротивлений.

Распределение температуры, полученное в результате электротермического анализа для некоторого приращения времени, передается в последующий механический анализ.

При механическом анализе равномерно распределенное давление, рассчитанное исходя из заданного усилия сжатия и площади контактной поверхности верхнего электрода с деталью, прикладывается к вершине верхнего электрода. Основание нижнего электрода ограничено в перемещении во всех направлениях. Площадь начальных контактов деталь–деталь и электрод–деталь принимается равной площади холодного металлического контакта поверхностей и в дальнейшем изменяется в зависимости от действующих в конкретном элементарном объеме напряжений и температуры. Результаты, полученные из деформационного анализа, включающие деформированную сетку конечных элементов под действием усилия сжатия электродов и теплового расширения свариваемых деталей, новое распределение давления на модифицированных контактных поверхностях деталь–деталь и электрод–деталь, передаются обратно в электротермический анализ. Алгоритм процедуры пошагово-совмещенного расчета отражен на рисунке 2.2.

Общая математическая модель процесса сварки представляет собой систему нелинейных уравнений, дополненных зависимостями свойств свариваемых

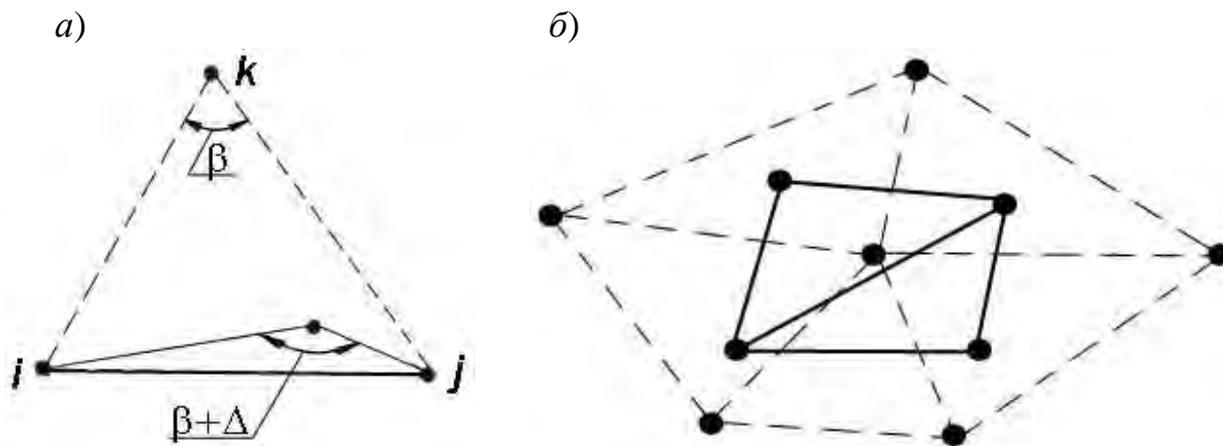


ваемых деталей и электродов от температуры. Нелинейность уравнений обусловлена следующими факторами: материалом (нелинейная связь между напряжениями и деформациями) и заданными граничными условиями.

При моделировании процесса рельефной сварки возникают трудности, связанные со значительной пластической деформацией конечных элементов, составляющих рельеф. Указанные элементы, как правило, должны полностью вытесняться из зоны сварки. Этот процесс приводит к искажению конечно-элементной сетки, что неблагоприятно влияет на точность решения или прекращает его. Программа ANSYS позволяет ввести новую неискаженную сетку (адаптивное переразбиение) в процессе расчета с учетом изменения и обновления граничных условий и контроля взаимного пересечения поверхностей контактных тел.

В разработанной математической модели осуществляется модификация сетки конечных элементов в процессе расчета с учетом изменения и обновления граничных условий. Параметрами адаптивного переразбиения являются: частота модификации геометрии модели; величина деформации конечного элемента, при которой производится его переразбиение; минимальные размеры модифицированного конечного элемента.

На рисунке 2.3, *а* показано, что при деформации конечного элемента угол между его гранями изменяется на величину Δ , и, если в процессе расчета Δ достигнет 40° , происходит процедура переразбиения сетки конечных элементов, включающая следующие этапы [79, 154].



а – деформация конечного элемента в процессе расчета; *б* – расположение модифицированной сетки конечных элементов; — — — — — конечный элемент на предыдущем инкременте; ————— конечный элемент на последующем инкременте

Рисунок 2.3 – Процедура модификации сетки конечных элементов

1 Сохранение данных по ключевым элементам геометрии модели (это внешние контуры модели, а также узлы (границы), находящиеся в контактном взаимодействии или к которым приложены граничные условия).

2 Нахождение элементов с минимальным (заданным пользователем) размером грани (данные грани конечных элементов не модифицируются).

3 Переразбиение модели на конечные элементы:

- экстраполяция данных из точек интегрирования в узловые значения;
- вычисление средних узловых значений, основанных на вложениях от различных элементов;
- размещение новых узлов конечных элементов в треугольном регионе (рисунок 2.3, б);
- определение значений переменных в новых узлах посредством линейной интерполяции;
- определение данных в новых точках интегрирования посредством интерполяции узловых значений новой сетки.

4 Присвоение данных (напряжений, температур, разности потенциалов и т. д.) соответствующим элементам и достижение нового равновесия системы в конце инкремента.

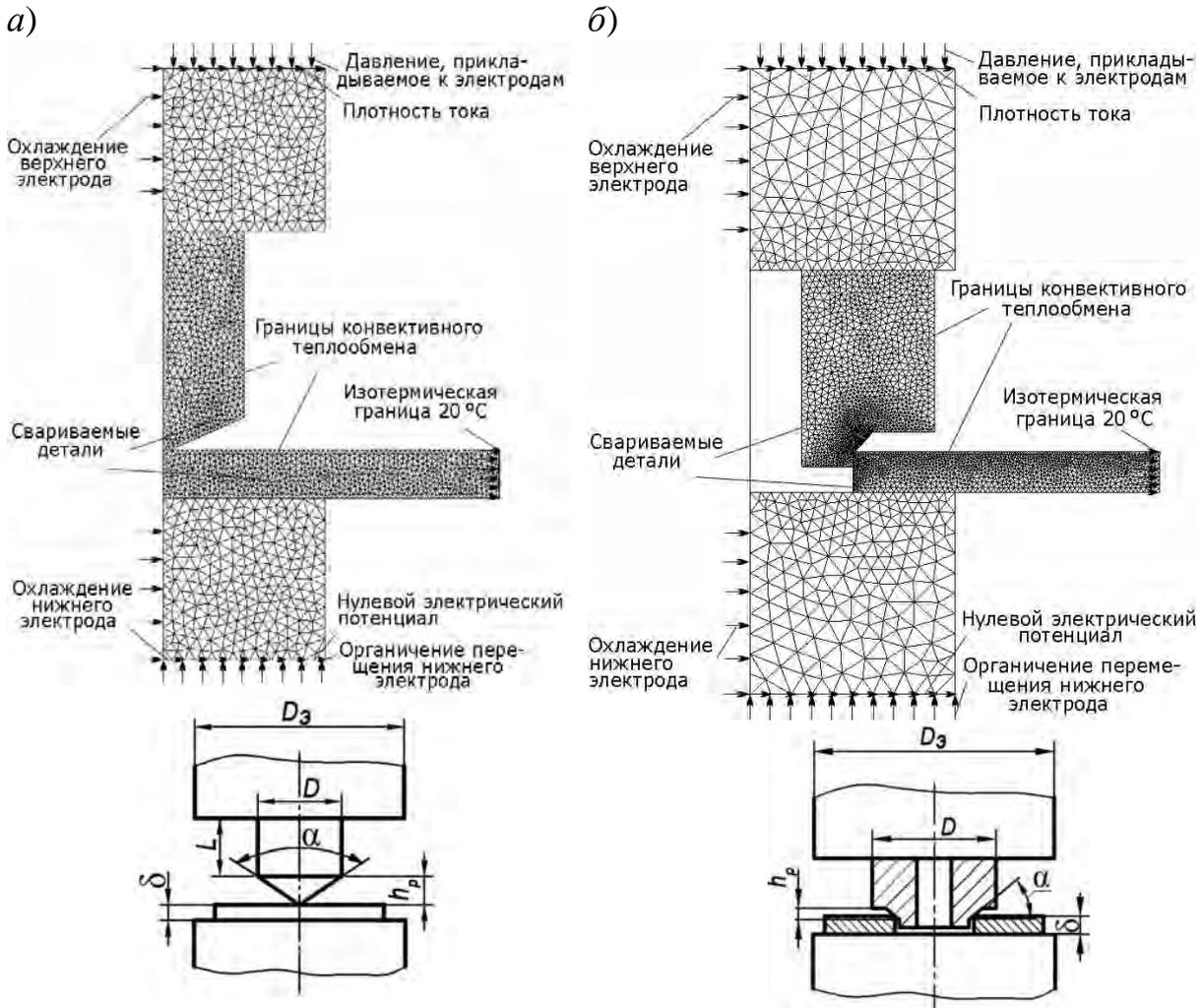
Моделируемый объект обладает геометрической осью симметрии. Поэтому начальные и граничные условия также симметричны по отношению к оси электродов, все расчеты в связи с этим можно рассматривать как решение осесимметричной задачи в цилиндрической системе координат.

На рисунке 2.4 показано разбиение осесимметричных моделей электрод–детали–электрод на конечные элементы для соединения стержня с плоской деталью с использованием конусообразного рельефа и цилиндрической бобышки с листом при помощи рельефа «острой гранью» [77–80].

Схема пространственной разбивки моделей выбрана с учетом основных особенностей исследуемых объектов, что отразилось в увеличении степени дискретизации отдельных участков (в зоне образования сварного соединения имеют место большие градиенты температуры и напряжений, поэтому в указанной области необходима повышенная частота разбиения модели на конечные элементы).

В расчетах учитываются электротеплофизические и механические свойства свариваемых деталей и электродов, зависящие от температуры и структурных превращений. Высокотемпературные (примерно от 1000 К и до температуры плавления) свойства задаются исходя из условий сходимости вычислительного процесса. Учет фазовых переходов осуществляется при помощи опции LATENT HEAT заданием величины скрытой теплоты, температуры ликвидуса и температуры солидуса [130–136].





a – сварка стержня с листом; *б* – сварка бобышки с листом; D_3 – диаметр электрода; D – диаметр привариваемого стержня (бобышки); h_p – высота рельефа; α – угол рельефа; δ – толщина листовой детали

Рисунок 2.4 – Разбиение осесимметричной модели на конечные элементы и схемы соответствующих сварных соединений

2.2 Методика моделирования электрических и температурных полей в зоне сварного соединения

В электрическом анализе нулевой электрический потенциал устанавливается на нижнем торце электрода, а распределение плотности тока вычисляется исходя из заданного мгновенного значения величины напряжения на торце верхнего электрода, площади контактных поверхностей электродов с деталями и электропроводности контактов (см. рисунок 2.4).

В поставленной задаче будем пользоваться математическими формулировками в осесимметричной постановке с применением цилиндрической

системы координат (r, θ, z) , поэтому искомое распределение температурных и электрических полей не будет зависеть от угловой координаты θ .

Электрический потенциал может быть выражен стационарным уравнением электропроводности Лапласа [136–140]

$$\sigma_E \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\sigma_E}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \sigma_E \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.1)$$

где φ – функция электрического потенциала от текущих координат r и z ;
 σ_E – удельная электрическая проводимость материала, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

В качестве начальных и граничных условий для решения дифференциального уравнения электропроводности использовались следующие.

Распределение электрического потенциала в начальный момент времени τ_0 для всех узлов модели принимали равным нулю: $\varphi(r, z, \tau_0) = 0$.

Граничное условие первого рода состояло в задании функции распределения потенциала на границе объекта. Граница с постоянным потенциалом $\varphi = 0$ В задавалась на основании нижнего электрода.

Граничное условие второго рода состояло в задании распределения переменного электрического потенциала $\varphi(r, z, \tau)$ на границе верхнего электрода.

На границе области решения и оси симметрии модели задавалось отсутствие изменения разности потенциалов.

Во многих моделях контактной сварки используются среднеквадратичные или действующие (RMS) значения для переменного электрического тока. Однако использование значения RMS при моделировании не отличает сварку переменного тока от сварки постоянным током, хотя и значительно упрощает моделирование. Вместе с тем оно не учитывает периодические циклы нагрева и охлаждения, обусловленные формой сигнала мгновенного переменного тока. В каждом полупериоде сетевого напряжения, когда ток падает до нуля, тепловложение в зону сварки резко снижается, и сварной шов эффективно охлаждается за счет потерь теплоты в основной металл и электроды с водяным охлаждением.

Адекватные модели должны учитывать мгновенное значение тока в любой момент времени и, как следствие, эффект периодических циклов нагрева и охлаждения. Приращение времени, выбранное при моделировании пошагово-связанной задачи, должно отражать циклический характер переменного тока. Для этого наибольший прирост времени не должен превышать $1/8$ полупериода сварочного тока.

Нестационарное уравнение теплопроводности Фурье имеет следующий вид [136, 138–141]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_B = C\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.2)$$

где T – функция температуры от текущих координат r и z ;

τ – длительность протекания процесса сварки, с;

γ – плотность материала, кг/м³;

λ – удельная теплопроводность материала объекта, Дж/(с · м · К);

C – удельная теплоёмкость материала объекта, Дж/(кг · К);

Q_B – количество тепловой энергии, выделяемое в единицу времени в рассматриваемом элементарном объеме, Дж/(м³ · с).

При решении тепловой задачи учитывались следующие начальные и граничные условия.

Температура в начальный момент времени τ_0 для всех узлов модели принималась равной температуре окружающей среды $T(r, z, \tau_0) = 293$ К.

Граничное условие первого рода состояло в задании функции распределения температур $T_{Si} = f(r, z, \tau)$ на границах объекта. В рассматриваемом случае изотермическая граница с температурой окружающей среды $T_{Si} = 293$ К задавалась по краю листовой детали вдоль всей ее толщины, а температура $T_{Si} = 281$ К – на сварочных электродах вдоль оси симметрии для учёта их водяного охлаждения (см. рисунок 2.3).

Граничное условие второго рода состояло в задании распределения плотности теплового потока $q(r, z, \tau)$, которое определялось удельной теплопроводностью λ материалов свариваемых деталей и электродов. На линии симметрии задавалось нулевое значение плотности теплового потока.

Граничное условие третьего рода, характеризующее теплообмен между свободными границами объекта и окружающей средой, определялось коэффициентом конвективной теплоотдачи α_K . Для расчёта данного коэффициента плоских и цилиндрических поверхностей в условиях естественной конвекции в неограниченном пространстве использовались следующие зависимости [142].

Для вертикально ориентированной поверхности электрода и детали

$$\alpha_K = A_2 \left(\frac{T - T_S}{h} \right)^{1/4}, \quad (2.3)$$

где α_K – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м² · К);

T – температура поверхности твердого тела, К;

T_S – температура окружающей среды, К;

A_2 – коэффициент, учитывающий физические параметры среды, Вт/(м^{7/4} · К^{5/4}), для воздуха при $T_S = 293$ К $A_2 = 1,38$ [142, таблица 1.5];



h – высота вертикальной поверхности, м.

Для горизонтально ориентированной поверхности детали

$$\alpha_K = A_2 \cdot b \cdot \left(\frac{T - T_s}{L} \right)^{1/4}, \quad (2.4)$$

где L – наименьшая сторона поверхности, м;

b – коэффициент, характеризующий пространственное положение поверхности ($b = 1,3$ – для поверхности, обращённой нагретой стороной вверх; $b = 0,7$ – для поверхности, обращённой нагретой стороной вниз).

Правильное моделирование свойств контактов, таких как электро- и теплопроводность, и изменение площади контакта в зависимости от параметров режима сварки, таких как температура и давление, имеют решающее значение для моделирования КТС. В ранних работах контактное сопротивление моделировалось с использованием двумерных твердых элементов путем назначения им эквивалентных свойств контактного сопротивления. В большинстве работ по моделированию КТС контактное сопротивление задавалось на основе проб и ошибок с целью достижения оптимального соответствия между расчетными и экспериментальными данными. Поэтому требовалось разработать согласованную методику, позволяющую не только включать свойства контактов в общий электротермический анализ как переменную функцию, но и периодически обновлять площадь контактов в процессе расчета без внешнего вмешательства. Поскольку непосредственно измерять удельное электросопротивление контакта трудно, вместо него при моделировании обычно рассматривается контактное сопротивление [143, 144].

Кроме того, общее контактное сопротивление можно разделить на статическое и динамическое для лучшего понимания характера его изменения. Статическое сопротивление более выражено на начальном этапе процесса сварки, так как возникает из-за образования оксидных пленок, наслоений масел, грязи на поверхности металла и т. д. Его можно измерить с использованием пробного постоянного тока относительно небольшой величины (порядка 1 А), который практически не разогревает контакт. Однако измеренные значения неинформативны и не могут быть непосредственно использованы в численном анализе. По сути, разрушение пленки при механической нагрузке и интенсивном нагревании на начальной стадии сварки занимает очень малое время, и сопротивление, измеренное в этот период, не отражает сопротивления при дальнейшем протекании процесса сварки [136].

Существующие модели в основном фокусируются на сопротивлении после разрушения поверхностной пленки, т. е. на динамическом сопротивлении,

которое в общем случае можно измерить как отношение действующих значений напряжения и тока непосредственно в процессе сварки.

Значения динамического сопротивления более информативны во время фактического протекания процесса сварки. Тем не менее существует множество факторов, которые влияют на динамическое сопротивление, такие как геометрия электрода, сварочный ток, толщина листа, температура и приложенное усилие сжатия, и их воздействие трудно поддается количественному определению.

Статические и динамические сопротивления не являются, собственно, свойствами материалов, они зависят от условий сварки и параметров ее режима, и такая зависимость может быть измерена экспериментально. Статическое сопротивление уменьшается почти линейно при увеличении усилия сжатия электрода. Точно так же динамическое сопротивление обратно пропорционально приложенному усилию [136, 145].

Однако общее сопротивление, измеренное в экспериментах, не очень помогает в моделировании КТС, хотя его можно использовать для уточнения модели конечных элементов (МКЭ). Необходима информация о зависимости контактного и объемного удельных электросопротивлений от температуры и давления. Объемное удельное электросопротивление, как правило, мало зависит от давления, но сильно зависит от температуры. С другой стороны, удельное сопротивление контактов, наоборот, является очень зависимым от состояния поверхности и механической нагрузки. Поэтому были разработаны различные модели для описания зависимости удельного электросопротивления контактов или, во многих случаях, контактного сопротивления от давления, температуры и других условий для использования в моделировании МКЭ [79, 140, 146].

Удельное электросопротивление контакта ρ_{contact} на границе раздела может быть рассчитано, принимая во внимание микропластическую деформацию шероховатых поверхностей для определения реальной площади контакта между ними [136]:

$$\rho_{\text{contact}} = 3 \left(\frac{\sigma_{\text{Tsoft}}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \right) + \rho_{\text{contam}}, \quad (2.5)$$

где σ_{Tsoft} – предел текучести более пластичного металла в контакте;

σ_n – контактное (нормальное) давление на границе раздела;

ρ_1 и ρ_2 – объемные удельные сопротивления металлов;

ρ_{contam} – удельное сопротивление поверхностных загрязнений, таких как оксидные и масляные пленки, жир и т. д.



Удельное сопротивление загрязнений ρ_{contam} необходимо учитывать, так как оно может в значительной степени влиять на общее контактное сопротивление.

Аналогично теплопроводность контакта k_{contact} поверхностей может быть выражена как

$$k_{\text{contact}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{\text{Tsoft}}} \right) \left(\frac{k_1 + k_2}{2} \right), \quad (2.6)$$

где k_1 и k_2 – теплопроводности контактирующих материалов.

Когда ток сужается при прохождении через проводящие контактные пятна, максимальная температура в точке контакта T_s может быть выше, чем объемная температура T_0 . Следовательно, повышенное сопротивление контакта R_C по сравнению с сопротивлением, которое могло существовать, если бы контакт металл–металл был непрерывным во всей области R_{C0} , может быть выражено как [147]

$$R_C = R_{C0} \left[1 + 2/3\alpha(T_s - T_0) \right], \quad (2.7)$$

где $T_s - T_0$ – сверхтемпература;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Согласно теории электрических контактов [144, 147] падение напряжения U между контактными поверхностями определяется выражением

$$U^2 = 4L(T_s^2 - T_0^2), \quad (2.8)$$

где L – постоянная Видемана–Франца–Лоренца, $L = 2,45 \cdot 10^{-8}$ (В/К)².

Очевидно, что даже относительно небольшое увеличение падения контактного напряжения U может значительно повысить сверхтемпературу $T_s - T_0$, достаточную для размягчения или плавления проводящих ток областей.

Данная модель действительна для металлических контактов, а контактные члены подчиняются закону Видемана–Франца–Лоренца

$$k\rho = L \cdot T, \quad (2.9)$$

где k – теплопроводность, Вт/(м·К);

ρ – удельное электросопротивление, Ом/м;

T – температура, К.



Таким образом, электрическая проводимость контакта может быть выражена как проводимость зазора σ_g , $(\text{Ом} \cdot \text{м}^2)^{-1}$, и иметь следующий вид [79, 136, 147]:

$$\sigma_g = \frac{I}{2\pi r_c^2 \sqrt{L(T_s^2 - T_0^2)}}, \quad (2.10)$$

где I – величина сварочного тока, А;

r_c – радиус поверхности контакта, м.

Плотность сварочного тока, проходящего через поверхность контакта двух металлов, задавалась зависимостью

$$j_k = \sigma_g (\varphi_a - \varphi_b), \quad (2.11)$$

где $\varphi_a - \varphi_b$ – разность электрических потенциалов точек контактных поверхностей, В.

Вышеприведенная формулировка основана на предположении о том, что площадь контакта (выраженная через радиус r_c) является зоной плотного металлического контакта. Это позволяет учитывать зависимость контактного зазора от давления через r_c . Электрические контакты типа проводник–проводник называются еще механическими контактами.

Реальная или фактическая площадь контакта в сотни раз меньше номинальной (контурной) площади контактирующих поверхностей из-за шероховатости, неровности, наличия непроводящих пленок. Фактическая площадь контакта увеличивается с повышением нагрузки. Исследования показывают, что количество контактных площадок возрастает почти пропорционально увеличению контактного давления до того момента, пока вся поверхность не станет зоной механического контакта. В отсутствие оксидной пленки и загрязнений на поверхности фактическая площадь контакта совпадает с контурной, которая определяется областью приложения давления.

Очевидно, что контактное сопротивление обратно пропорционально фактической площади контакта и, соответственно, приблизительно обратно пропорционально контактному давлению. Эта зависимость определяется свойствами свариваемых материалов.

В случае плоских контактов твердых тел задача сводится к определению поведения контактов с шероховатыми поверхностями. Неровности в расчетах обычно представляют в виде выступов, имеющих форму шаровых сегментов. При замыкании контакта в первую очередь приходят в соприкосновение эти выступы.



При возрастании усилия P степень деформации в контакте увеличится, и после того, как она достигнет предела упругости, начинается пластическая деформация микровыступов. Они могут деформироваться пластически и образовывать наклеп, в то время как слои металла, лежащие в глубине, испытывают главным образом упругую деформацию. Пластическая деформация с возрастанием усилия P распространяется на весь отпечаток. В течение этого процесса среднее давление в отпечатке увеличивается с ростом P . Вначале оно повышается быстро, а затем его рост замедляется и достигает значения примерно в 3 раза больше давления, соответствующего началу пластической деформации, которое называют контактной твердостью [144].

Предположим теперь, что выступы воспринимают все контактное усилие P и деформируются в такой степени, что среднее давление у них равно контактной твердости. В этом случае, например для низкоуглеродистой стали, контактное сопротивление должно быть обратно пропорционально давлению. Это означает, что проводимость зазора должна быть приблизительно пропорциональна контактному давлению. Таким образом, если давление в зазоре превышает значение контактной твердости, электрическая проводимость рассчитывается по уравнению (2.10).

В связи с этим падение напряжения на границе контакта при любой объемной температуре $T_0 < T_S$ может быть использовано для расчета эквивалентного контактного сопротивления или удельного сопротивления в зависимости от температуры путем деления падения напряжения на величину сварочного тока. При температурах выше температуры солидуса T_S металла значение удельного электрического сопротивления этого материала может использоваться для контактных элементов в моделировании [136].

При моделировании радиус контакта r_c и контактное давление в зазоре, полученные из предыдущего теплового механического анализа, выступают в качестве входных данных для модуля электротермического анализа через опцию переменных полей. Затем может быть разработана подпрограмма пользовательского интерфейса для расчета проводимости зазора на основе температуры узла, узлового давления и общей площади контакта.

Тепловой поток, проходящий через контактные поверхности двух тел, определялся соотношением [143, 144]

$$q_c = \sigma_c^T (T - T_0), \quad (2.12)$$

где σ_c^T – тепловая проводимость контакта, Вт/(м²·К);

T – температура поверхности первого контактного тела, К;

T_0 – температура поверхности второго контактного тела, К.



Тепловая проводимость контакта представлена в виде суммы следующих составляющих:

$$\sigma_C^T = \frac{1}{R_{Me}} + \frac{1}{R_C}, \quad (2.13)$$

где R_{Me} – термическое сопротивление фактического контакта, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

R_C – термическое сопротивление межконтактной среды, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

На основе данных, приведенных в [143], в принятой модели контакта между двумя металлическими материалами определение термического сопротивления фактического контакта и термического сопротивления межконтактной среды осуществляется по следующим зависимостям:

$$R_{Me} = \frac{1}{2,12 \overline{\lambda}_M \left(\frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}} \cdot 10^{-4}, \quad (2.14)$$

где $\overline{\lambda}_M$ – приведенная теплопроводность контактирующих материалов, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

p – давление, прикладываемое к контактирующим поверхностям, $\text{Н}/\text{м}^2$;

\overline{E} – приведенный модуль Юнга контактирующих материалов, $\text{Н}/\text{м}^2$;

B_n – коэффициент, характеризующий геометрические свойства контактирующих поверхностей.

$$R_C = \frac{(h_{cp1} + h_{cp2})(1 - m)}{\lambda_C}, \quad (2.15)$$

где h_{cp1} , h_{cp2} – средние высоты выступов микронеровностей контактных поверхностей;

m – коэффициент заполнения профиля микронеровностей;

λ_C – коэффициент теплопроводности межконтактной среды (воздуха), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

2.3 Моделирование процесса упругопластического деформирования металла зоны соединения

Локализованные градиенты температур, обусловленные выделением тепла и потерями, вместе с механической нагрузкой при сжатии электродов оказывают термомеханическое воздействие на сварную конструкцию. Условия равновесия при моделировании могут быть установлены с использованием теоремы виртуальной работы, в которой говорится, что виртуальное изменение



внутренней энергии деформации должно быть компенсировано одинаковым изменением внешней виртуальной работы из-за приложенных нагрузок.

Адекватная температурная зависимость механических свойств материала играет важную роль в точности моделирования. Что касается температурных зависимостей электротермических свойств, то также имеется нехватка экспериментальных данных, особенно при температурах, близких к температуре плавления. Использование адекватных термомеханических свойств может существенно повысить точность моделирования.

В идеале необходимо учитывать значительные пластические деформации для установления точной зоны контакта электродов и деталей во время формирования ядра, а также для получения данных об остаточных напряжениях и упругом последствии.

Таким образом, постановкой задачи является создание математической модели быстропротекающих деформационных процессов в широком интервале температур с учетом различных видов деформаций, имеющих место при формировании сварных соединений.

Физическая нелинейность, связанная с упругопластическими деформациями и нестационарным температурным полем, описывалась с использованием теории неизотермического пластического течения [149–151].

Задача теории упругости состоит в определении функций перемещения в рассматриваемой области, которые удовлетворяют дифференциальным уравнениям равновесия и контурным условиям. Если предположить, что перемещения в любой из точек конечного элемента можно выразить в зависимости от перемещений в узлах, то задача определения поля перемещений во всей области сводится к вычислению перемещений в узлах. Если известно поле перемещений, то нетрудно получить поле деформаций и поле напряжений.

В рассматриваемой математической модели используются тензоры напряжений и деформаций, а также связи между их компонентами (уравнения равновесия и совместности деформаций). На рисунке 2.5 показаны составляющие вектора перемещений, на рисунке 2.6 – тензора напряжений.

Принимая внешние нагрузки симметричными по отношению к оси электродов, все расчеты в связи с этим относим к области осесимметричной проблемы теории упругости и пластичности с использованием для расчетов цилиндрической координатной системы r, z, θ [79]. При решении осесимметричной задачи внешние нагрузки и граничные условия принимали инвариантными по отношению к координате θ . Следовательно, составляющая перемещений в направлении касательной к θ линии v и составляющие тензора деформаций $\tau_{r\theta}$ и $\tau_{z\theta}$ равны нулю. Тогда векторы перемещений $\{u\}$, деформаций $\{\epsilon\}$ и напряжений $\{\sigma\}$ становятся вида [152–154]



$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix}; \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = [L]\{u\} = \begin{bmatrix} \partial/\partial r & 0 \\ 0 & \partial/\partial z \\ 1/r & 0 \\ \partial/\partial z & \partial/\partial r \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix}; \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix}, \quad (2.16)$$

где u, w – векторы перемещений по осям r и z соответственно;

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – нормальные напряжения;

τ_{rz} – касательное напряжение сдвига;

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – компоненты линейной деформации;

γ_{rz} – компонента угловой деформации элементарного объема тела;

$[L]$ – матрица-оператор.

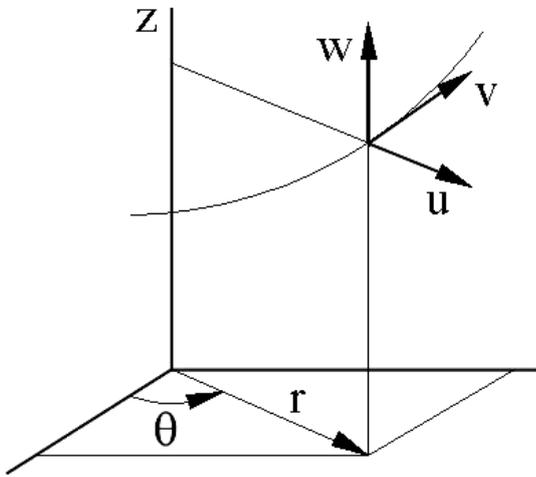


Рисунок 2.5 – Составляющие вектора перемещений

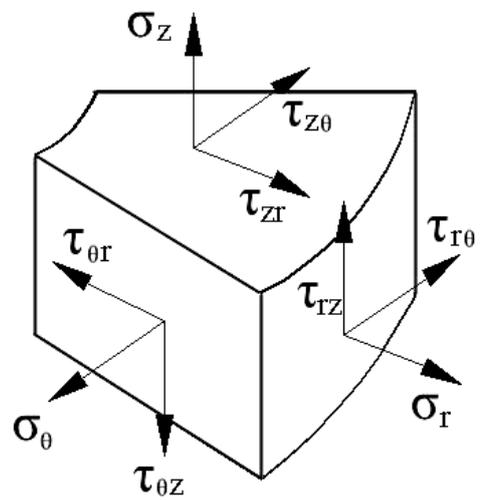


Рисунок 2.6 – Составляющие тензора напряжений

Математическую модель напряженно-деформированного состояния металла зоны сварного соединения представляем в виде двух подсистем дифференциальных уравнений – уравнений равновесия и уравнений совместности деформаций [153–156]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0; \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{rz}}{\partial r \partial z}; \\ \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} + \frac{[\varepsilon_\theta - \varepsilon_r]}{r} = 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Данные уравнения дополнены следующими начальными и граничными условиями:

– отсутствие напряжений в исследуемой среде в начальный момент времени $\tau_0 = 0$: $\sigma_r = 0$, $\sigma_\theta = 0$, $\sigma_z = 0$, $\tau_{rz} = 0$;

– равномерно распределенное давление, прикладываемое к верхнему электроду (см. рисунок 2.4);

– ограничение перемещения основания нижнего электрода в направлении оси z .

Согласно теории пластического неизотермического течения при решении поставленной задачи приращение полной деформации металла зоны соединения представим в виде суммы трех слагаемых [63, 64]:

$$\{d\varepsilon\}^\Sigma = \{d\varepsilon_{\text{упр}}\} + \{d\varepsilon_{\text{пл}}\} + \{d\varepsilon_{\text{темпл}}\}, \quad (2.19)$$

где $\{d\varepsilon_{\text{упр}}\}$, $\{d\varepsilon_{\text{пл}}\}$, $\{d\varepsilon_{\text{темпл}}\}$ – приращения упругой, пластической и температурной деформаций соответственно.

Упругую составляющую полной деформации определяем исходя из обобщенного закона Гука с учетом зависимости механических характеристик материала от температуры. Связь между составляющими напряжений $\{\sigma\}$ и деформаций $\{\varepsilon\}$ в случае изотропных упругих тел в матричной форме выражается следующим образом [149, 150]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon_0\}, \quad (2.20)$$

где D – матрица коэффициентов упругости;

$\{\varepsilon_0\}$ – вектор температурных деформаций.

Матрица коэффициентов упругости имеет вид [61, 63]:

$$[D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

где E – нормальный модуль упругости;

μ – коэффициент поперечной деформации (Пуассона), который при упругом деформировании для сталей составляет 0,25...0,33, для бронзы – 0,32...0,35.

Температурные деформации ε_0 , обусловленные тепловым воздействием на металл при нагреве, охлаждении и фазовых превращениях, определялись следующим выражением [29, 157]:

$$\varepsilon_0 = \alpha_T \cdot \Delta T, \quad (2.22)$$

где α_T – коэффициент температурного расширения материала, 1/К;

ΔT – приращение температуры.

Общепринятая формулировка метода конечных элементов предполагает отыскание поля перемещений и тем самым связана с минимизацией потенциальной энергии системы при нахождении узловых значений вектора перемещений и последующем вычислении компонентов тензоров деформаций и напряжений.

Для описания процессов пластического деформирования материала при переменной температуре существует теория пластического течения [149–151, 155]. Согласно этой теории приращения деформаций рассматриваются как сумма приращений упругой и пластической составляющих. Необратимые деформации в материале возникают при выполнении некоторого условия текучести, зависящего от температуры, накопленной ранее пластической деформации и др. При этом инкремент пластических деформаций прямо пропорционален градиенту напряжения:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2.23)$$

где $d\lambda$ – коэффициент пропорциональности;

$\partial F/\partial \sigma_{ij}$ – вектор, перпендикулярный к поверхности текучести.



В случае протекания в рассматриваемом объеме пластических деформаций система уравнений метода конечных элементов является нелинейной. Для решения такой системы необходимо перейти к системе линейных алгебраических уравнений. При этом предполагается, что напряжения и деформации связаны между собой зависимостью, формально совпадающей с законом Гука. Однако вместо коэффициентов E , G и ν в данные уравнения входят модуль пластичности E' , модуль пластического сдвига G' , коэффициент Пуассона $\nu' = 0,5$. Для описания неизотермического деформирования металла при сварке использовалось уравнение теории течения с условием текучести по Мизесу без упрочнения [158, 159]

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2} = \sigma_T, \quad (2.24)$$

где σ_i – интенсивность напряжений или обобщенное напряжение, характеризующее работу и мощность пластической деформации;

σ_T – предел текучести материала.

Связь между инкрементальными деформациями и напряжениями для упругопластического материала выражается в следующем виде [159, 160]:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{d\sigma_{ij}}{2G} + \frac{1-2\mu}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} + d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} + \delta_{ij} \alpha_T \Delta T. \quad (2.25)$$

При моделировании процессов плавления и кристаллизации использовался вычислительный подход, при котором конечные элементы, соответствующие расплавленному литому ядру, сохраняли свои механические свойства, соответствующие температуре, близкой температуре плавления, а процесс их деформирования оставался непрерывным.

При достижении температуры плавления во время нагрева твердое вещество плавится и начинает формироваться ядро. Рассматривать плавление напрямую как металлургический процесс при моделировании трудно. Для моделирования плавления общепринятой практикой является быстрое изменение свойств материала, такое как модуль Юнга, удельная теплоемкость и др. при температурах, близких к солидусу или ликвидусу. Эффект скрытой теплоты учитывается увеличением теплоемкости, как указано в следующем уравнении [136]:

$$\bar{C} = C + \frac{L}{T_L - T_S} \quad \text{при } T_S < T < T_L, \quad (2.26)$$



где L – скрытая теплота плавления;

T_L и T_S – температуры ликвидуса и солидуса.

При плавлении металл, в общем, теряет способность выдерживать нагрузку. Поэтому его механические характеристики падают практически до нуля. Общей практикой является задание при температуре плавления и выше минимальных механических свойств, таких как, например, модуль Юнга (обычно менее 10 % от его значения при комнатной температуре).

Непрерывный переход между значениями температурных свойств материала в твердом состоянии и при плавлении необходим во избежание потерь сходимости расчета при моделировании. Как только начинается плавление, пластическая деформация в расплавленном ядре перестает существовать в контексте сплошной механики, на которой основана программа ANSYS.

Процесс кристаллизации можно рассматривать таким же образом, поскольку его нельзя смоделировать с использованием коммерческих пакетов МКЭ. Особое внимание нужно обратить на то, что при моделировании начала кристаллизации металла для конечных элементов, подвергшихся «плавлению», должна быть наложена предыстория с нулевым напряжением. Как правило, для моделирования изменения свойств материалов при плавлении и кристаллизации необходима разработка пользовательских подпрограмм.

Вышеизложенные рекомендации использовались при конечно-элементном расчете быстропротекающих термомодеформационных процессов в зоне формирования сварного соединения при контактной точечной и рельефной сварке.

2.4 Специфика математического моделирования процесса рельефной сварки в программной среде ANSYS

Спецификой математического моделирования процесса рельефной сварки являются большие пластические деформации рельефа и значительные искажения сетки конечных элементов в зоне соединения. Процесс моделирования условно можно разделить на несколько этапов:

- математическое моделирование процесса без протекания сварочного тока на этапе предварительного сжатия;
- решение контактной задачи;
- отслеживание деформации и смятия рельефа;
- математическое моделирование процесса с протеканием сварочного тока и образованием расплавленного ядра;
- организация пошагово-совмещенного электротермомодеформационного расчёта процесса КРС;
- кристаллизация металла и образование остаточных напряжений;
- валидация математического моделирования, проверка сходимости результатов моделирования на основе экспериментальных исследований.



На данный момент существует необходимость в создании полной, адекватной, подтверждённой реальными экспериментальными исследованиями математической модели процесса контактной рельефной сварки.

Алгоритм подготовительного этапа моделирования представлен на рисунке 2.7.

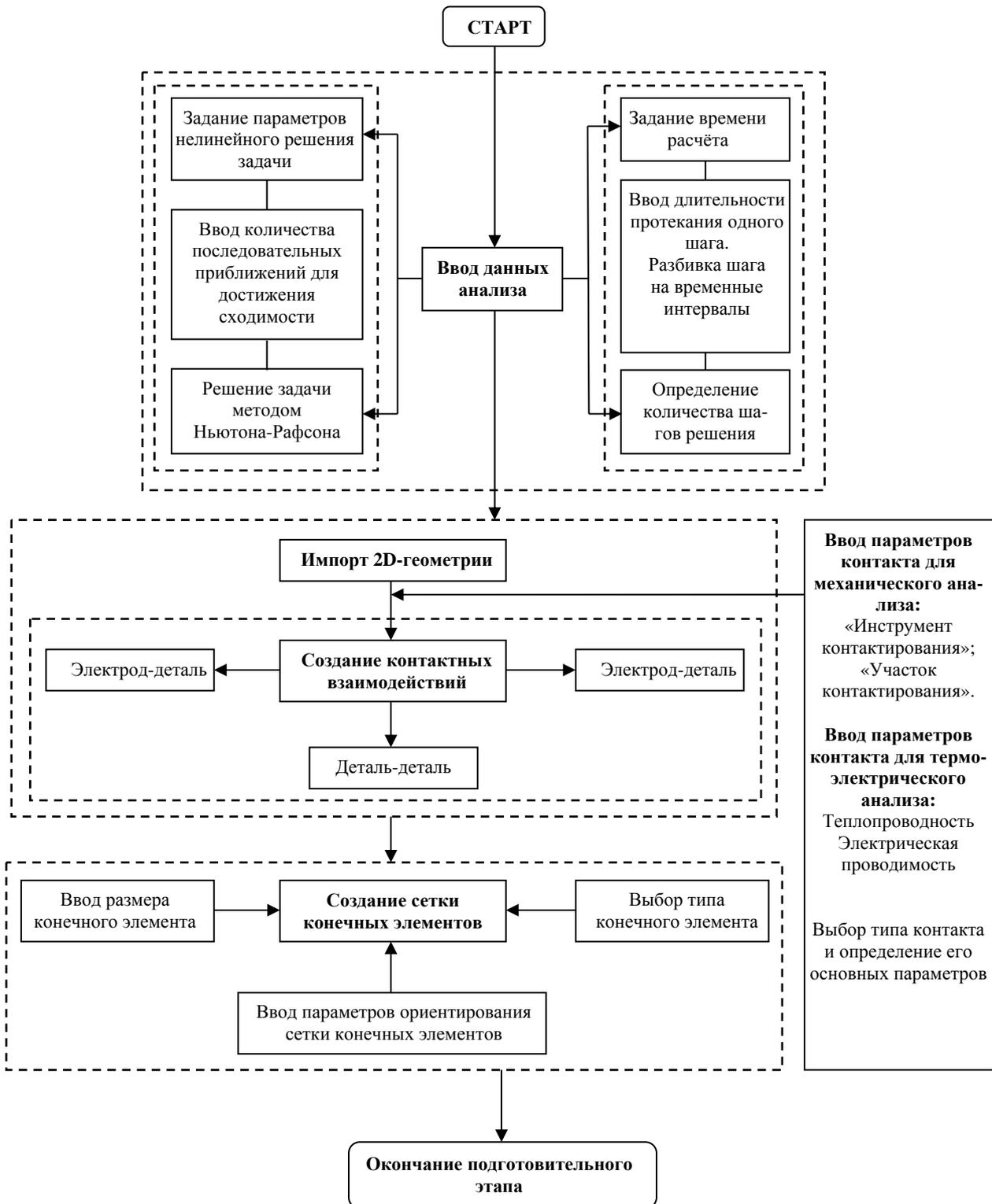


Рисунок 2.7 – Алгоритм подготовительного этапа моделирования

Для решения поставленной задачи использовался компонент ANSYS Mechanical APDL (параметрический язык программирования ANSYS «ANSYS Parametric Design Language»), язык сценариев, с помощью которого пользователь может автоматизировать стандартные задачи или создавать собственную модель, выраженную через параметры (переменные). APDL также охватывает широкий диапазон других возможностей, типа повторения команды, макроса, выполнения различных проверочных и логических переходов, создания циклов, разбиения процесса на циклы, а также скалярных, векторных и матричных операций. APDL – основа для решения сложных задач, таких как оптимизационный расчёт и адаптивное построение сетки.

Для задания нелинейности решения задачи процесс решения разбивается на n -е количество шагов, которые в свою очередь будут разбиваться на n -е количество подшагов. Решение нелинейной задачи производится методом итераций, в основе которого лежит метод Ньютона–Рафсона (или метод касательных). Разбиваем каждый шаг на 10 подшагов и указываем программе возможные вариации количества подшагов (от 8 до 20). Задается приоритетный способ решения задачи – разбиение на подшаги. С помощью метода Ньютона–Рафсона функция протекания сварочного тока вычисляется более точно.

При создании геометрии математической модели в первую очередь происходит задание контактных взаимодействий и сетки конечных элементов. При этом задаются условия контактирования поверхностей компонентов модели. Контактam деталь–деталь и электрод–деталь назначается тип Friction – этот контакт учитывает силы трения, возникающие при перемещении конечных элементов, и исключает возможность интерференции.

Для получения адекватных результатов расчёта контактных задач следует особое внимание уделять параметрам конечно-элементной сетки для контактных пар. При использовании элементов первого порядка (линейных элементов) затрачивается меньше времени для вычисления касания и зазора, однако сеточное разбиение может оказаться недостаточно точным и повлиять на результаты анализа. Использование квадратичных элементов может ощутимо увеличивать время расчёта задачи, но даёт возможность точнее рассчитывать контактные характеристики и уменьшает вероятность нежелательных взаимных проникновений контактных элементов друг в друга. Необходимо подобрать такой размер конечного элемента, который позволяет адекватно описать геометрию предполагаемой области контакта, в частности, кривизну отдельных участков. Чрезмерно грубая дискретизация может сказаться на сходимости при расчёте при наличии явлений проскальзывания элементов в области контактирования. Для избегания нежелательных проникновений на контактной части нужно создавать более мелкие элементы. Кроме размеров элементов, необходимо отслеживать и их форму, так как конечные элементы с низким



соотношением сторон при нагружении могут сильно искажаться, что приводит к проблемам со сходимостью результатов.

Автоматически создаваемая сетка конечных элементов в программе ANSYS для решения контактной задачи не соответствует ранее указанным рекомендациям, поэтому перед расчётом производилась ручная адаптация сетки. Для рельефа назначается наименьший размер конечных элементов для повышения точности результатов. На нижней детали элементы уменьшаются при приближении к ее центру – месту контактирования с рельефом. Для электродов размерность конечных элементов больше, чем для деталей, они распределяются сверху вниз.

Далее в процессе расчёта ANSYS самостоятельно производит адаптивное переразбиение сетки.

Дополнительные параметры контактной пары задаются функциями «Инструмент контактирования» (Contact-Tool) и «Участок контактирования» (Pinball Region). При расчете контактной пары можно использовать расширенный метод Лагранжа, метод штрафов, уравнения связей либо метод множителей Лагранжа. Кроме того, необходимо задать следующие параметры контактного взаимодействия: тепловую проводимость контакта и электрическую проводимость контакта (см. формулы (2.10) и (2.13)).

ANSYS самостоятельно контролирует различные параметры в процессе решения контактной задачи, однако использование компонента Contact-Tool значительно упрощает расчёт и позволяет исключить некоторые сбои программ в процессе решения. Изначально указывается статус контактной пары, который отслеживает начальное положение контактных элементов относительно соответствующих им целевых элементов, определяющих их контактную позицию.

Для управления алгоритмом определения текущего статуса элементов используется параметр Pinball Region. Параметр задает радиус окружности, рассматриваемой в каждой точке интегрирования элемента. Если точка интегрирования другого контактного элемента попадает в область, захватываемую такой сферой, то элемент распознается программой как «близко расположенный», если не попадает в область – «далеко располагаемый». Данная функция позволяет получить более точные результаты контактной задачи.

Радиус оценочной сферы не должен быть слишком большим, так как это приведет к захвату очень большого количества конечных элементов и, соответственно, к увеличению времени расчёта. Поэтому применялся метод ручной настройки Pinball Region с разрешением в программе автоматического контроля радиуса в процессе расчёта.

Поведение контакта влияет на размер подшага, в результате чего может создаваться дополнительный временной шаг, который контролируется программой. Такой шаг используется для повышения сходимости результатов и позволяет выполнять различные программные корректировки. Программа сама

контролирует поведение контакта и в случае чрезмерного искажения предпринимает попытку его компенсации.

Для моделирования термоэлектрических процессов при контактной рельефной сварке предложен следующий алгоритм расчета (рисунок 2.8).

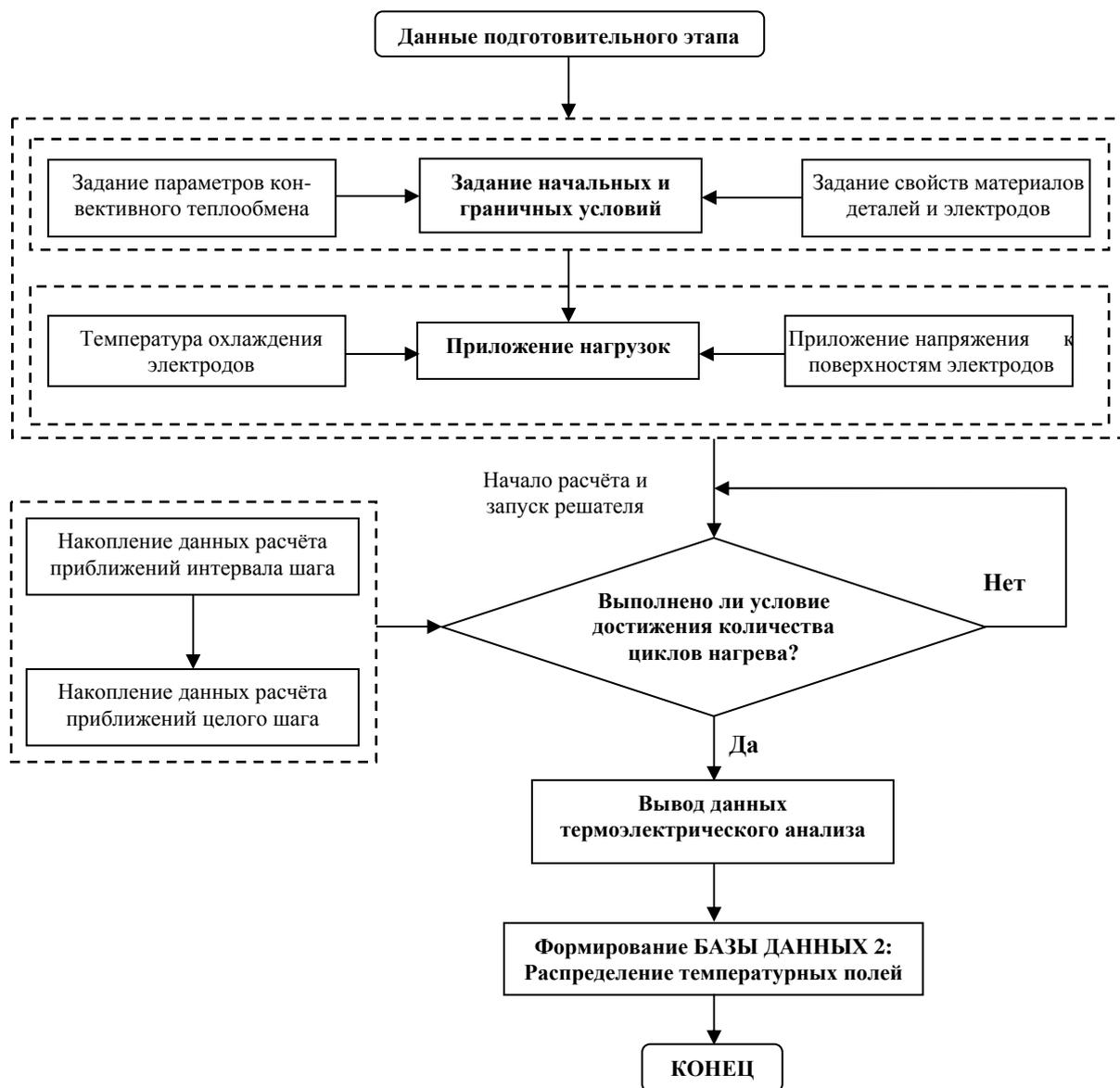


Рисунок 2.8 – Алгоритм процедуры термоэлектрического анализа

Для моделирования термоэлектрических процессов, проходящих при контактной рельефной сварке, задавались следующие термические и электрические свойства материалов свариваемых деталей (конструкционная сталь 08кп) и материала электродов (медный сплав БрХЦр): электрическое сопротивление, теплопроводность, удельная теплоёмкость, энтальпия.

Нагрузки, задаваемые в электротермическом анализе, представлены на расчётной схеме на рисунке 2.9 (штриховой линией обозначены поверхности, для которых задавался конвективный теплообмен).

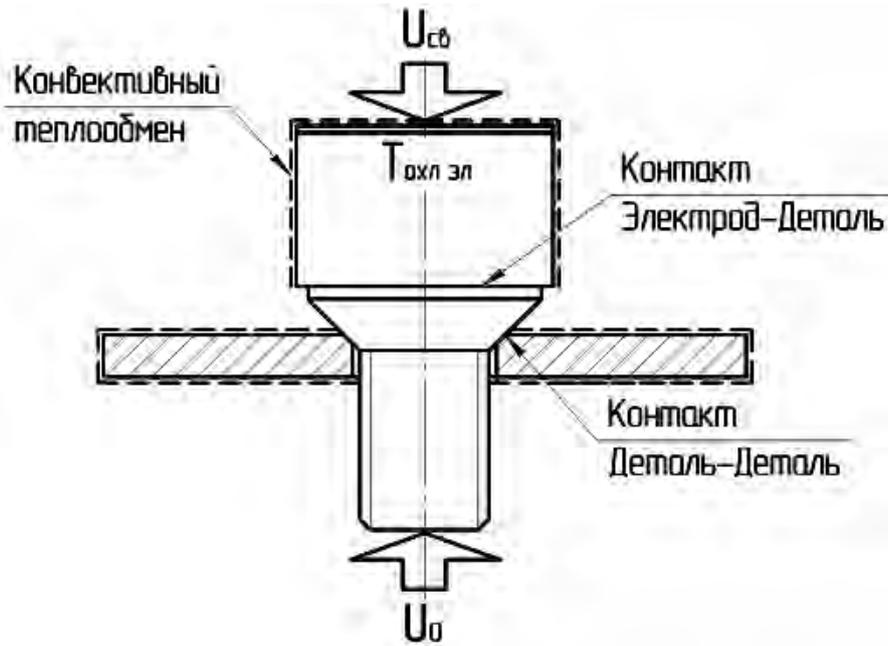


Рисунок 2.9 – Расчётная схема прикладываемых нагрузок в электротермическом анализе

К поверхности верхнего электрода прилагалось сварочное напряжение по синусоидальной зависимости (рисунок 2.10) с периодом, равным 0,02 с. Амплитудное значение напряжения в вершине синусоиды было принято $U_{св \max} = 2,5$ В. К поверхности нижнего электрода прилагалось напряжение с нулевым потенциалом $U_0 = 0$ В.

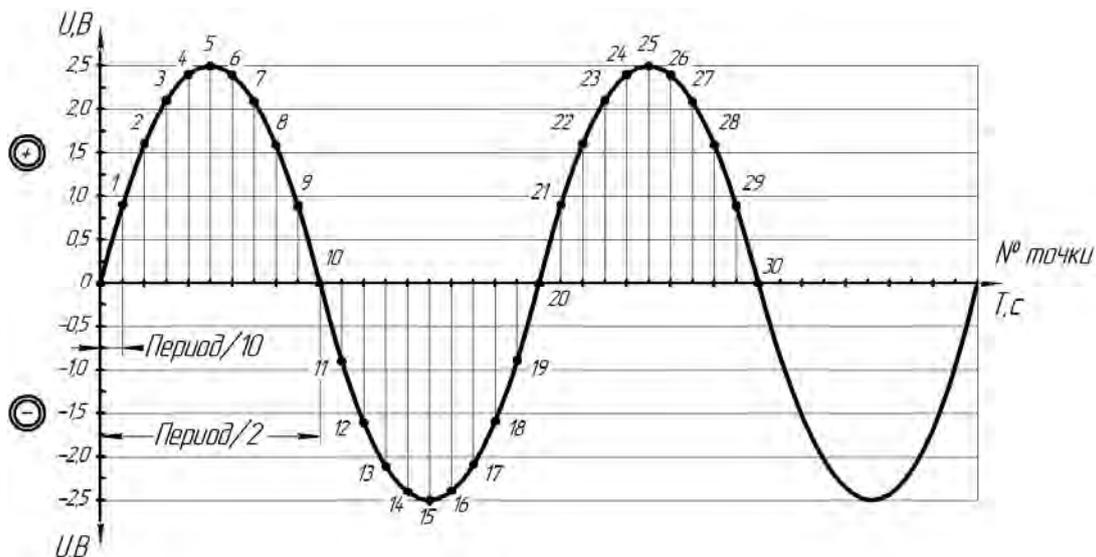


Рисунок 2.10 – Задание потенциала напряжения на верхнем электроде по синусоидальной зависимости

К поверхностям нижнего и верхнего электродов прикладывалась температура водяного охлаждения электродов $T_{\text{охл. эл.}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды задана по умолчанию ($T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$).

Для термоэлектрического анализа создавалась сетка конечных элементов, предназначенных для расчёта термоэлектрических процессов (рисунок 2.11). Производилась ручная адаптация сетки для получения наиболее точных результатов.

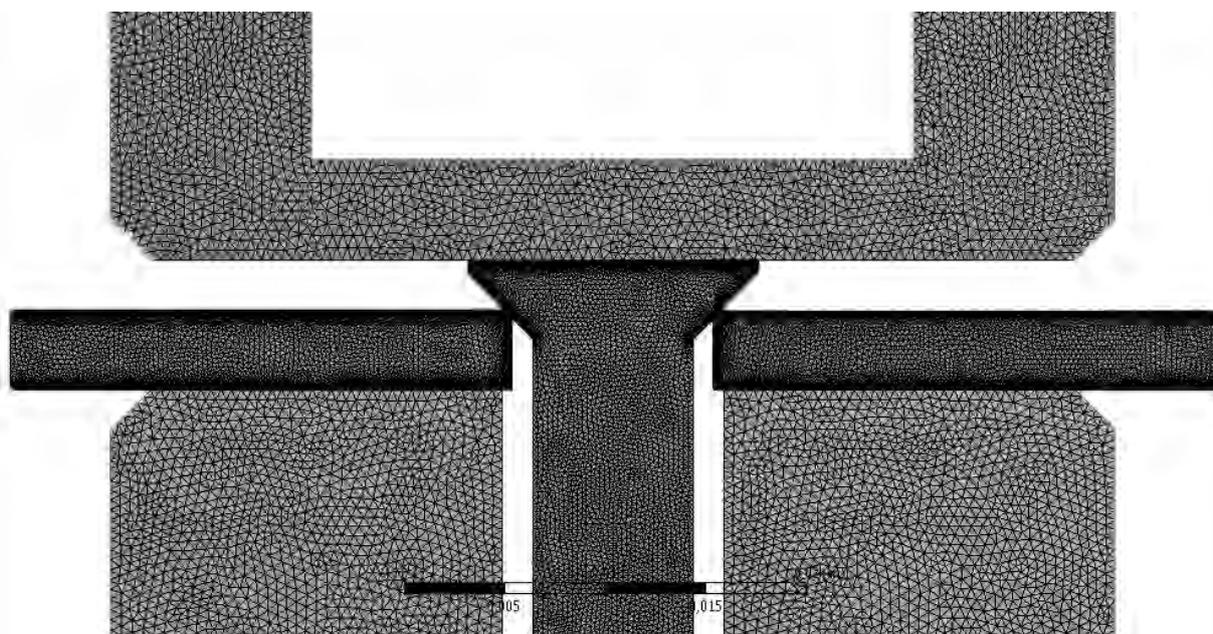


Рисунок 2.11 – Сетка конечных элементов электротермического анализа

Для электротермического анализа параметры адаптивности сетки конечных элементов не задавались, так как при данном расчёте отсутствуют пластические деформации, которые бы смогли исказить форму конечного элемента.

Блок-схема алгоритма механического анализа представлена на рисунке 2.12. Вначале каждому компоненту модели назначаем необходимые механические свойства материалов электродов и деталей вручную в табличном виде, так как стандартные материалы из библиотеки ANSYS не учитывают зависимость свойств материалов от температуры.

К верхнему электроду прикладываем усилие сжатия (1000...6000 Н) и ограничиваем перемещение нижнего электрода в осевом направлении. Запрещаем перемещение кромок свариваемых деталей в горизонтальной плоскости.

При исследованиях процессов образования деформаций и напряжений в качестве деформационной характеристики материала, вводимой в расчет, использовалась диаграмма идеального упругопластического материала с переменными механическими характеристиками (рисунок 2.13): модулем упругости E и пределом текучести σ_T материала. Применительно к низкоугле-

родистым сталям подобное упрощение не приводит к большим погрешностям, так как истинная диаграмма характеризуется наличием площадки текучести при протекании пластических деформаций до 3...4 %. Для количественной оценки конечных деформаций такие приближенные расчеты вполне достоверны и обеспечивают необходимую точность [59, 157].

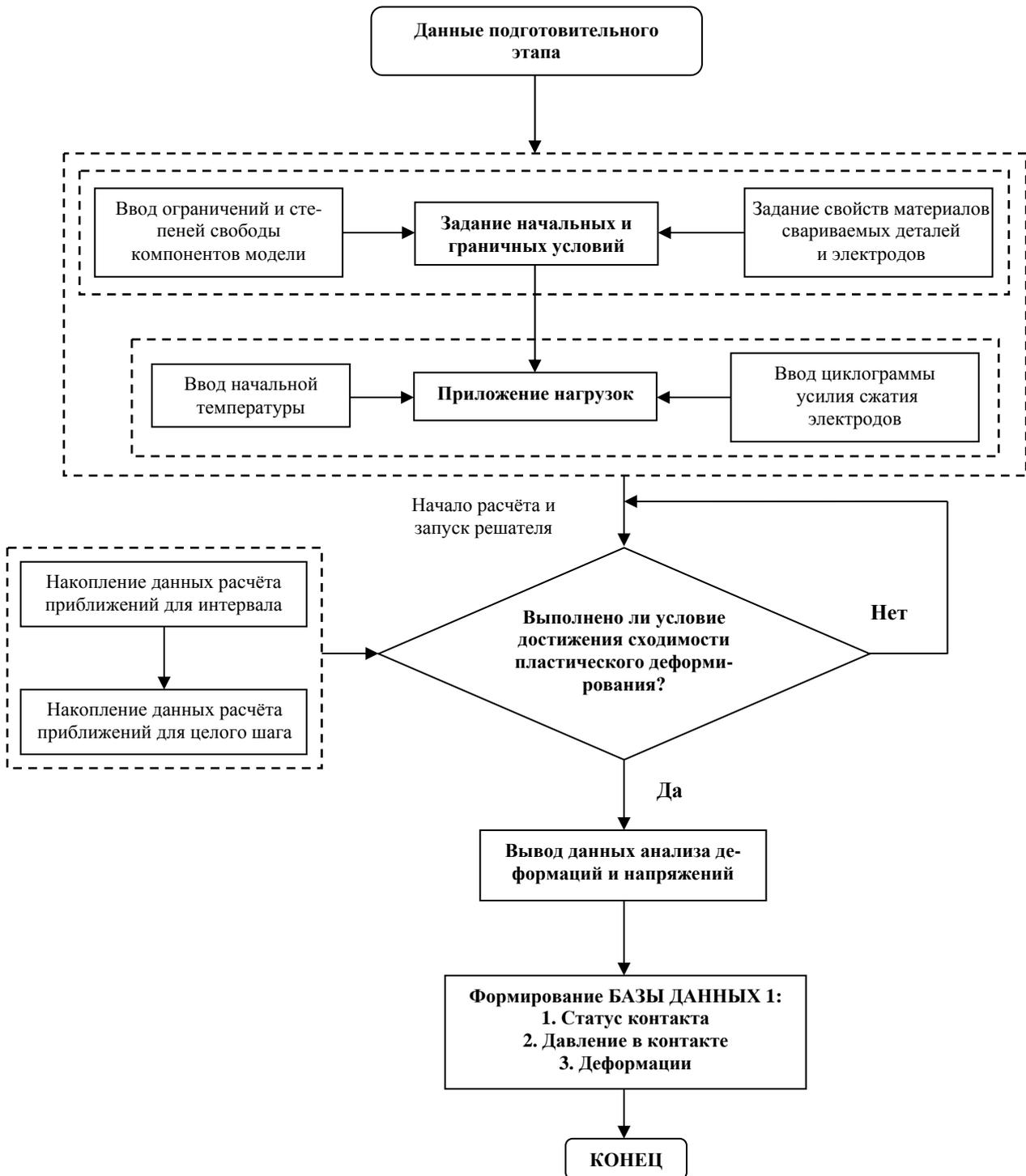


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритма механического анализа

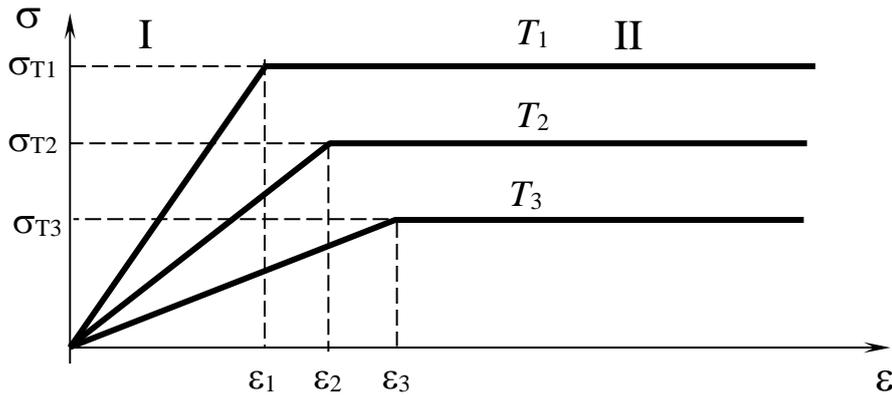


Рисунок 2.13 – Диаграмма идеального упругопластического материала с переменными механическими характеристиками

Уравнения термоупругопластичности являются нелинейными. Нелинейность уравнений возникает по двум причинам: сам процесс упругопластического деформирования отличается от линейного и коэффициенты, входящие в уравнения, также не являются константами, а зависят от результатов решения. Методы решения системы нелинейных уравнений гораздо сложнее и требуют большего объема вычислений, чем линейных. Поэтому нелинейные уравнения в пределах исследуемой области (конечного элемента) аппроксимируются некоторыми простейшими кусочно-непрерывными функциями, имеющими линейный характер [153].

На этапе предварительного сжатия при начальной температуре 20 °С механические свойства свариваемых материалов задавались неизменными. Методика моделирования деформации рельефа при этом включала в себя следующие этапы:

- 1) задание начальных граничных условий и приложение нагрузок;
- 2) создание адаптивной сетки конечных элементов;
- 3) решение контактной задачи;
- 4) оценка влияния усилия сжатия электродов на перемещение подвижного электрода и деформацию рельефа.

Для обеспечения сходимости вычислительного процесса решения упругопластической задачи при высоких температурах (от 900 °С до температуры плавления) использовались минимальные механические свойства материала (предел текучести σ_T , модуль упругости E , температурный коэффициент линейного расширения α_T), соответствующие температуре 900...1100 °С.

При моделировании процессов плавления и кристаллизации применялся вычислительный подход, при котором конечные элементы, соответствующие расплавленному литому ядру, сохраняли свои механические свойства, соот-

ветствующие температуре, близкой температуре плавления, а процесс их деформирования оставался непрерывным [60].

На этапе постпроцессинга выбирались следующие параметры: перемещения, деформации и напряжения. Наиболее часто используемым методом вычисления напряжений при компьютерном моделировании является метод эквивалентных напряжений и деформаций по Мизесу (Equivalent von Mises), которые вычисляются согласно теории упругопластичности.

Выводы

В процессе осадки рельефа металл зоны сварного соединения подвергается быстропротекающей пластической деформации. Подобная интенсивная локализованная деформация вызывает значительные трудности в достижении сходимости вычислительного процесса, приводит к недопустимым искажениям конечно-элементной сетки модели и, как следствие, преждевременному вынужденному окончанию расчета.

Для решения задач моделирования процесса контактной рельефной сварки был выбран программный комплекс ANSYS, который относится к числу лидеров в области CAE-продуктов конечно-элементного анализа. В ходе работы произведена оценка существующих моделей и методик математического моделирования процесса контактной рельефной и контактной точечной сварки. Выявлены их достоинства и недостатки.

Разработаны методика моделирования процесса контактной рельефной сварки в программном обеспечении ANSYS и алгоритм процедуры пошагово-совмещенного расчета, включающий подготовительный этап моделирования, процедуры термоэлектрического и механического анализа. Пошагово-совмещенный электротермодеформационный расчет использован для теоретических исследований кинетики формирования сварных соединений при контактной точечной и рельефной сварке.

3 Уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий регулированием термомодеформационного цикла точечной сварки

3.1 Механизм деформирования лицевых поверхностей изделий при двусторонней точечной сварке

Кинетика деформирования лицевой поверхности точечного соединения рассмотрена на примере сварки низкоуглеродистой стали толщиной 1,0 + 1,0 мм по циклограмме, представленной на рисунке 3.1, со следующими параметрами режима: $\tau_{СЖ} = 0,2$ с; $I_{СВ} = 10,5$ кА; $\tau_{СВ} = 0,16$ с; $F_{СВ} = 4$ кН.

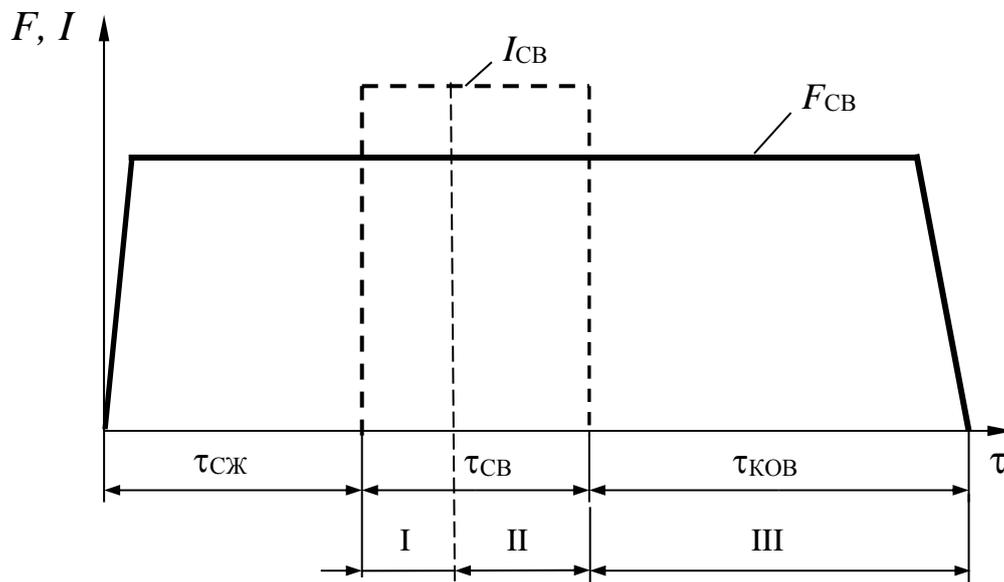


Рисунок 3.1 – Циклограмма процесса контактной точечной сварки

На рисунке 3.2 показано разбиение осесимметричной модели двусторонней контактной точечной сварки на конечные четырёхузловые элементы. В расчетах использовалась цилиндрическая система координат r, z, θ (см. рисунок 2.4). В результате моделирования установлено, что процесс деформирования лицевых поверхностей изделий при точечной сварке можно условно разделить на три этапа (см. рисунок 3.1) [161–163].

Приложение предварительного усилия сжатия $F_{СВ}$ к электродам в течение времени $\tau_{СЖ}$ служит для устранения сборочных зазоров между деталями и предупреждения наружных и внутренних выплесков за счет микропластической деформации неровностей в контактах и уменьшения контактного сопротивления между свариваемыми деталями. Модель позволяет оценить общую упругую деформацию электродов и деталей, а также величину

перемещения подвижного электрода U_z , которая после предварительного сжатия ($\tau_{сж} = 0,2$ с) составляет около 0,1 мм (рисунок 3.3).

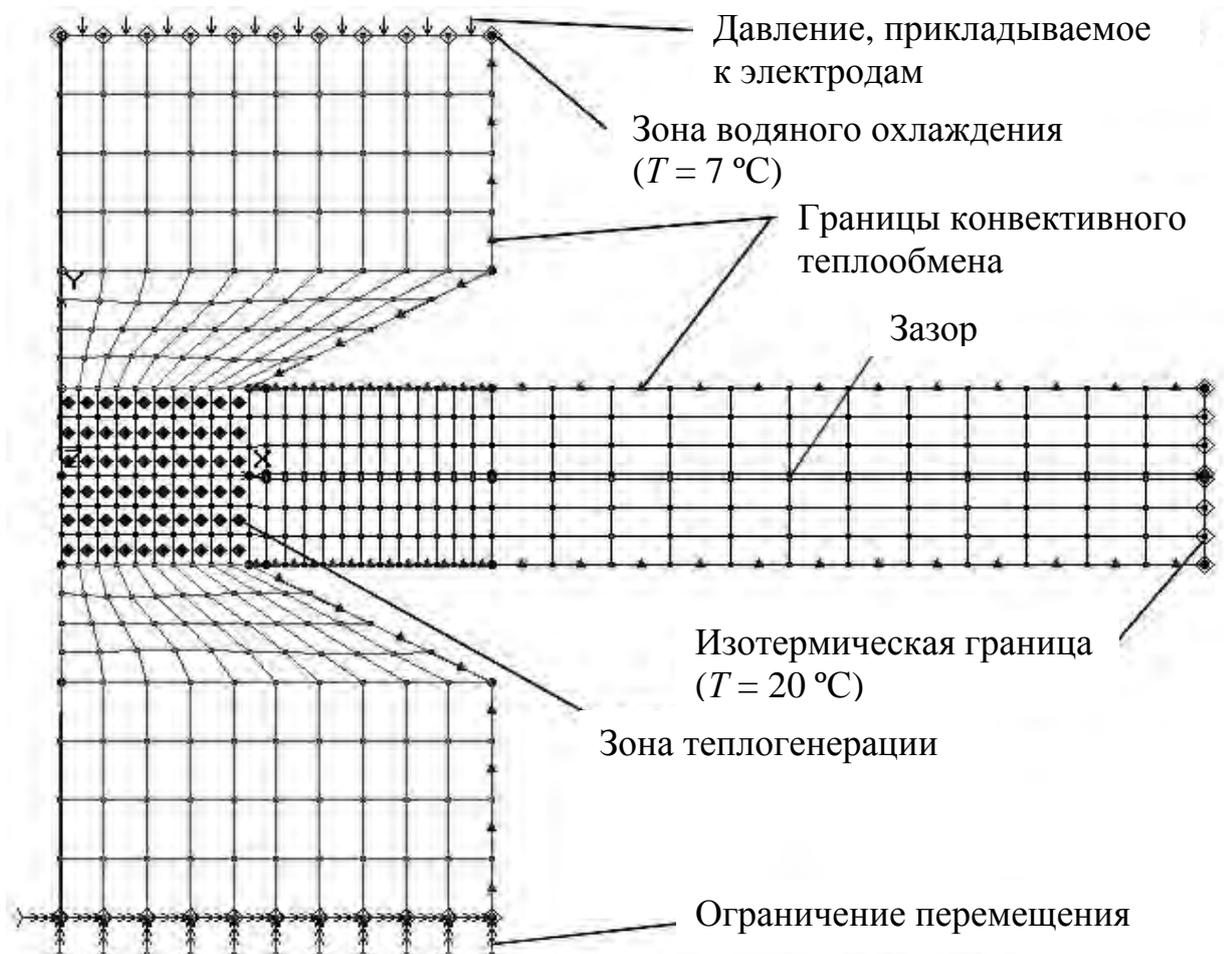


Рисунок 3.2 – Конечно-элементная модель контактной точечной сварки

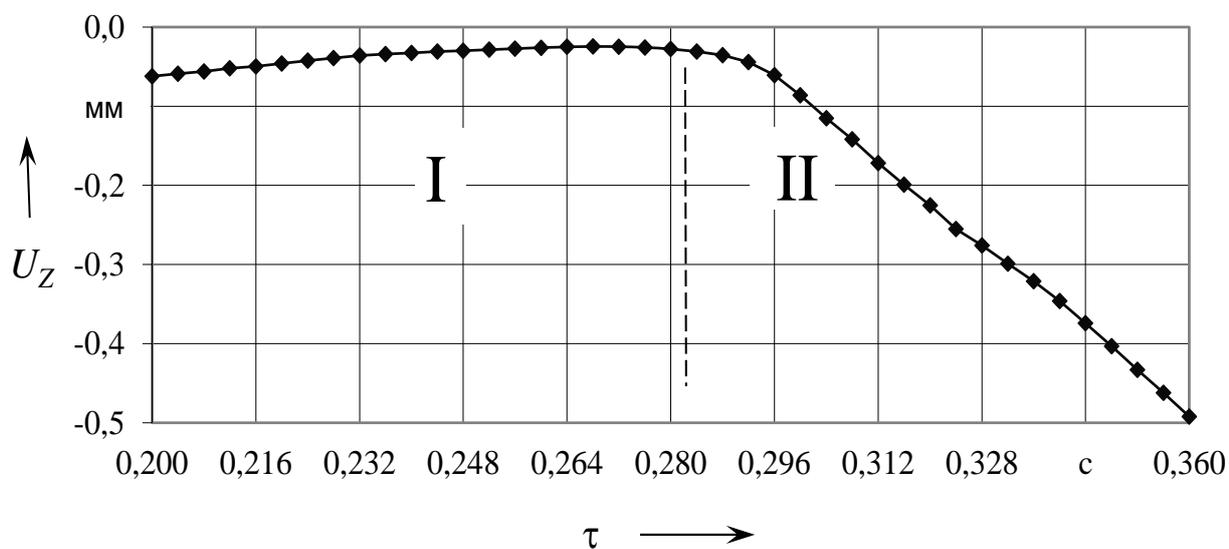


Рисунок 3.3 – Перемещение подвижного электрода (этапы I, II)

Первый этап процесса деформирования лицевых поверхностей начинается с момента включения сварочного тока. Начальный нагрев металла способствуют тепловому расширению металла межэлектродной зоны. Вследствие дилатометрического эффекта наблюдается перемещение подвижного электрода вверх на расстояние 0,03...0,04 мм (см. рисунок 3.3). Локальное расширение металла зоны соединения способствует увеличению зазора между свариваемыми деталями (рисунок 3.4). При нагреве металла растет его пластичность. Этап заканчивается в момент достижения условий текучести ($\tau_{CB} = 0,07...0,08$ с), когда интенсивность напряжений σ_i в зоне соединения становится равной пределу текучести σ_T металла наиболее нагретых зон. В зоне контакта деталь–деталь это равенство достигается быстрее, чем в контактах электрод–деталь.

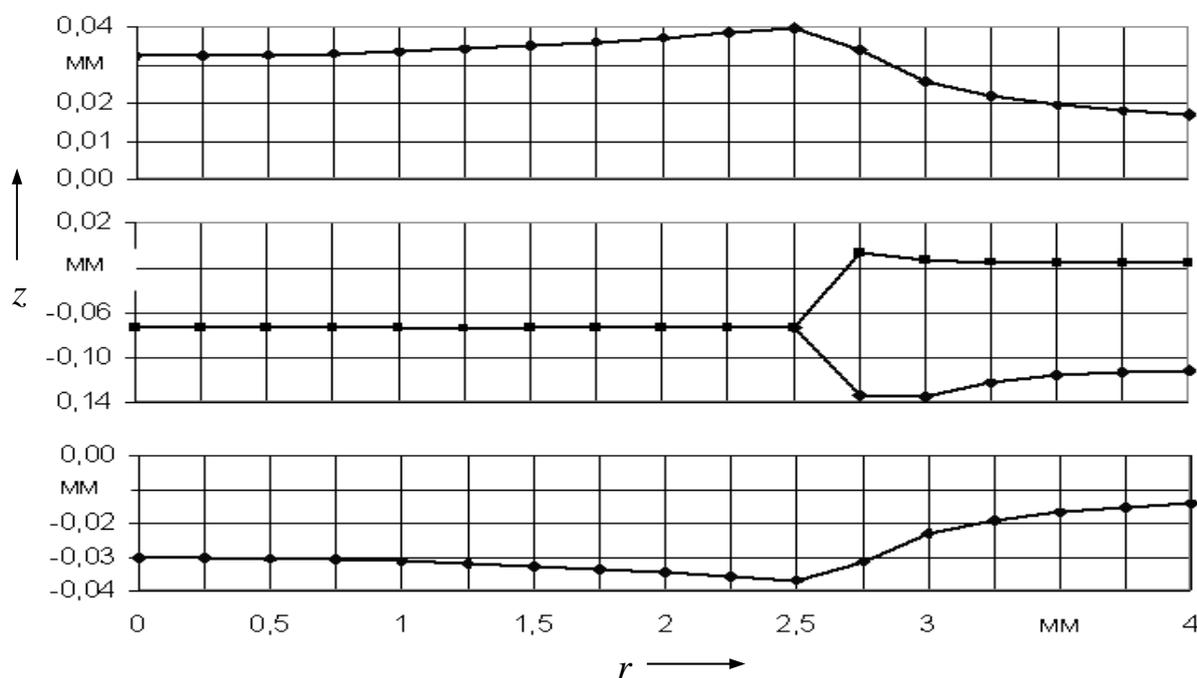


Рисунок 3.4 – Максимальное тепловое расширение металла ($\tau_{CB} = 0,08$ с)

На первом этапе можно оказывать влияние на уменьшение деформаций лицевых поверхностей за счет снижения усилия сжатия электродов F_{CB} на последующих этапах [161, 162]. Этому способствует, например, применение предварительного подогрева зоны сварки импульсом тока.

Второй этап характеризуется дальнейшим повышением температуры и снижением предела текучести свариваемого металла в контакте электрод–деталь, расплавлением металла и образованием ядра. Именно на этом этапе можно оказывать активное воздействие на характер образования вмятины. При достижении температуры поверхностных слоев металла $T = 600...700$ °C предел текучести σ_T металла резко снижается. Интенсивное тепловое расширение металла межэлектродной зоны компенсируется протекающим параллельно процессом пластической деформации, который начинает преобладать над

тепловым расширением. Вследствие этого происходит внедрение верхнего и нижнего токоподводящих электродов в детали (см. рисунок 3.3). Нагретый металл деформируется преимущественно в зазор между деталями, образуя пластический пояс, который способствует удержанию расплавленного металла от выплеска. На этом этапе глубина вмятины растет наиболее интенсивно. В момент выключения сварочного тока она может достигать величины, равной 5...10 % от толщины детали (рисунок 3.5) [161].

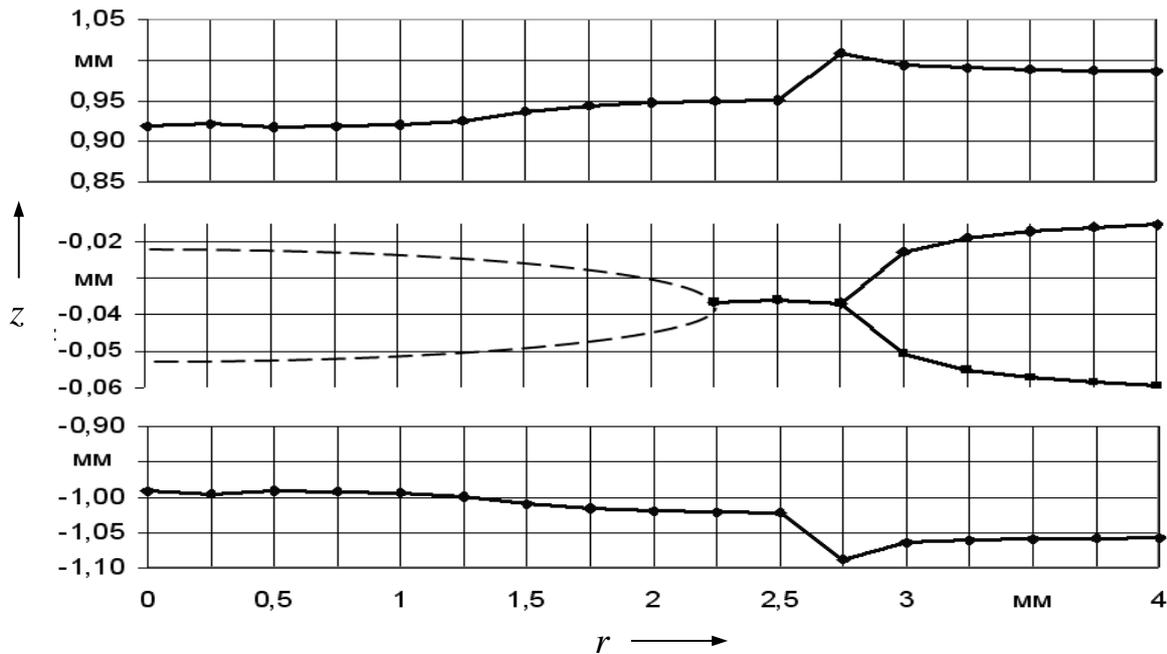


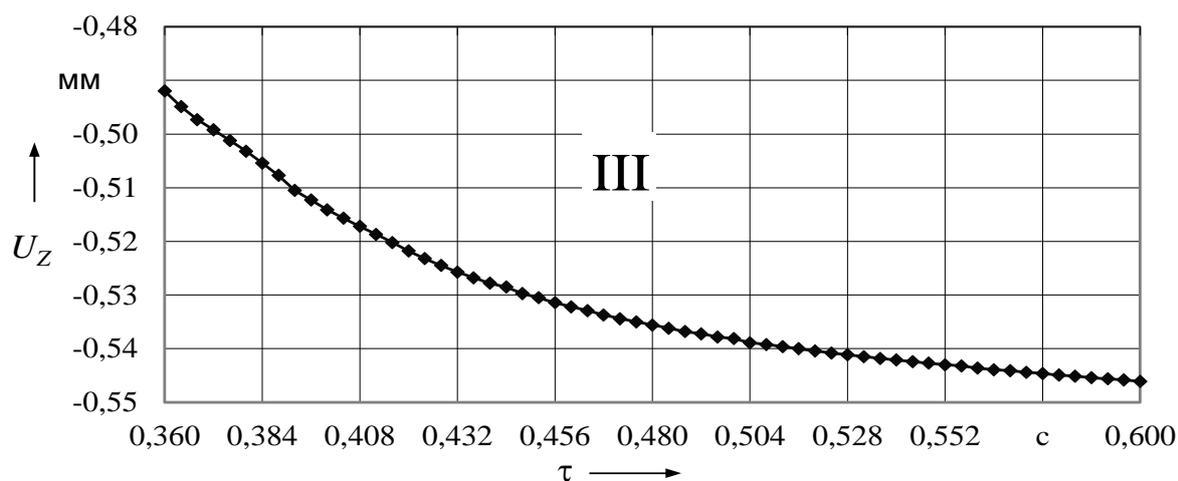
Рисунок 3.5 – Глубина вмятины в момент отключения тока ($\tau_{\text{св}} = 0,16 \text{ с}$)

Третий этап начинается с момента выключения сварочного тока. При проковке на стадии охлаждения происходит усадка металла зоны соединения и уменьшение его объема. При этом продолжается пластическая деформация нагретого металла и внедрение электродов в свариваемые детали (рисунок 3.6, а). К концу этапа при точечной сварке глубина вмятины может достигать 15...20 % от толщины детали (рисунок 3.6, б).

Применяемые режимы точечной сварки разделяют на несколько групп по их жесткости. В основе такого деления лежит плотность тока на контактной поверхности электродов. Применение режимов различной жесткости позволяет увеличить производительность, уменьшить остаточные напряжения и деформации, снизить тепловые потери на разогрев свариваемых деталей и электродов [50, 51].

Результаты расчетов показали, что с увеличением жесткости режима сварки заметно уменьшается внедрение подвижного электрода в деталь, что, соответственно, снижает и конечную глубину вмятин.

а)



б)

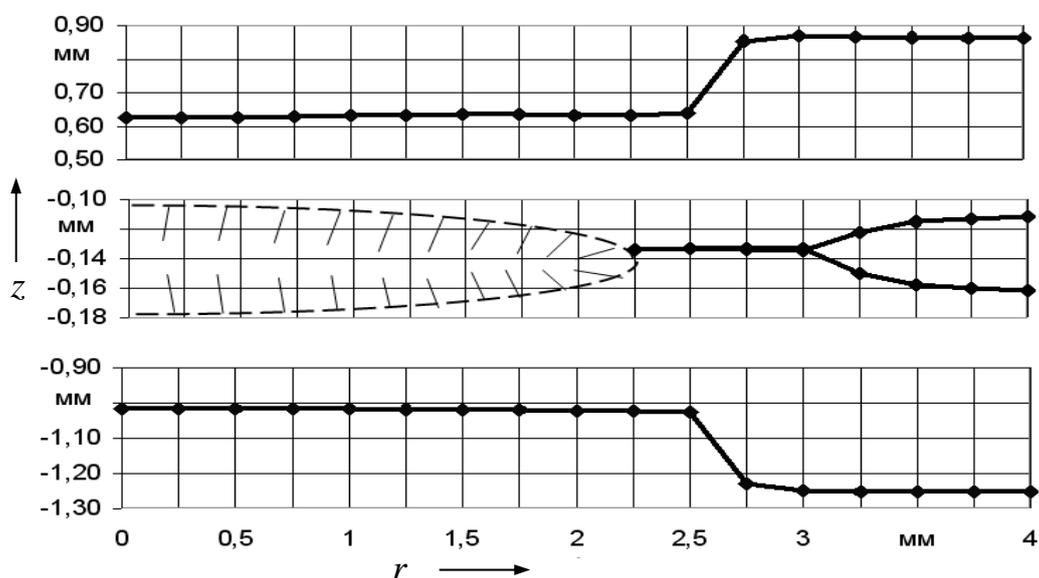
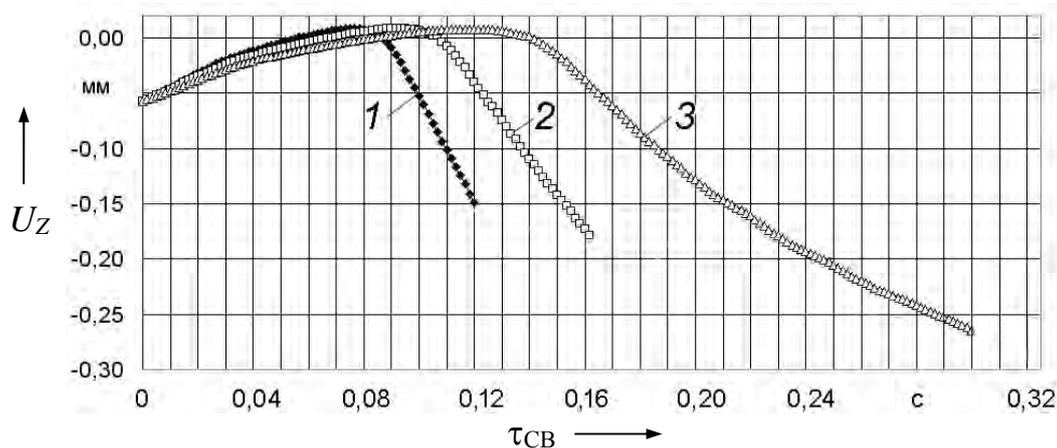


Рисунок 3.6 – Перемещение подвижного электрода при приложении усилия проковки $F_{ков}$ (этап III) (а) и глубина вмятины после проковки ($\tau_{ков} = 0,24$ с) (б)

На рисунке 3.7 представлены графики перемещения верхнего подвижного электрода U_Z при сварке стали Ст3 толщиной $1,0 + 1,0$ мм в зависимости от жесткости режима сварки до момента выключения сварочного тока. Момент выключения тока определялся условием образования минимального диаметра расплавленного ядра $d_{яmin} = 5$ мм. Так, при наиболее жестком режиме сварки ($I_{св} = 10,5$ кА; $\tau_{св} = 0,16$ с) величина перемещения электрода составляет $0,15$ мм, при среднем по жесткости ($I_{св} = 9,5$ кА; $\tau_{св} = 0,2$ с) – $0,18$ мм, при мягком ($I_{св} = 7,5$ кА; $\tau_{св} = 0,4$ с) – $0,27$ мм.

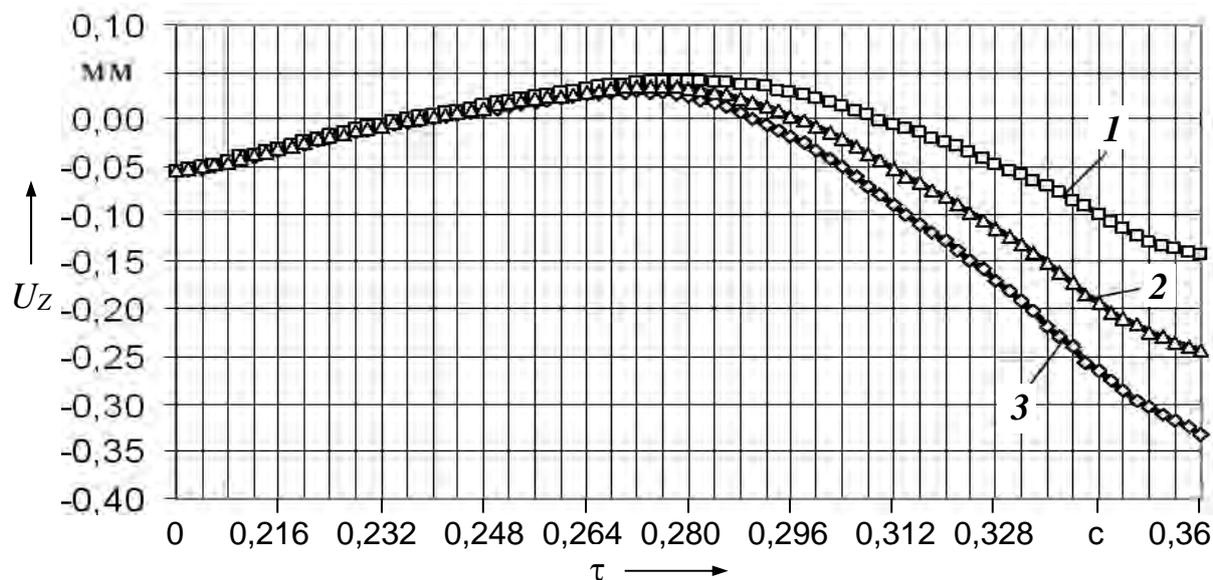
Значительное влияние на характер упругопластического деформирования деталей и образования вмятин при точечной сварке оказывает величина

усилия сжатия F_{CB} . При увеличении F_{CB} , а также при применении повышенных усилий проковки глубина вмятин растет. Одновременно увеличение F_{CB} препятствует образованию внутренних выплесков. Расчетные графики перемещения верхнего подвижного электрода при приложении различных усилий F_{CB} (при $I_{CB} = 10,5$ кА, $\tau_{CB} = 0,16$ с) свидетельствуют о значительном росте вмятины при увеличении F_{CB} (рисунок 3.8).



1 – $I_{CB} = 10,5$ кА; $\tau_{CB} = 0,16$ с; 2 – $I_{CB} = 9,5$ кА; $\tau_{CB} = 0,2$ с; 3 – $I_{CB} = 7,5$ кА; $\tau_{CB} = 0,4$ с

Рисунок 3.7 – Перемещение верхнего подвижного электрода в зависимости от жесткости режима сварки



1 – $F_{CB} = 2500$ Н; 2 – $F_{CB} = 3900$ Н; 3 – $F_{CB} = 5300$ Н

Рисунок 3.8 – Перемещение подвижного электрода в зависимости от величины усилия сжатия, прикладываемого к электродам

Практика показывает, что при двусторонней точечной сварке на серийных машинах предотвратить образование вмятин, возникающих из-за силового воздействия на зону сварки и наличия дефектов сборки узлов (сборочных зазоров), невозможно. Несоблюдение режимов сварки, заключающееся в чрезмерном увеличении сварочного тока или времени его протекания, сопровождается появлением внутренних и наружных выплесков расплавленного металла, что приводит к росту глубины вмятины до 30...40 % от толщины детали.

Увеличение жесткости режима, являясь одним из путей уменьшения деформаций, часто связано с ростом вероятности возникновения внутренних выплесков. Поэтому необходимо создание таких условий деформирования соединения, которые позволили бы снизить время протекания максимального тока, обеспечив при этом удержание расплавленного металла в межэлектродной зоне.

3.2 Способы регулирования напряженно-деформированного состояния при применении с лицевой стороны изделия электрода с увеличенной рабочей поверхностью

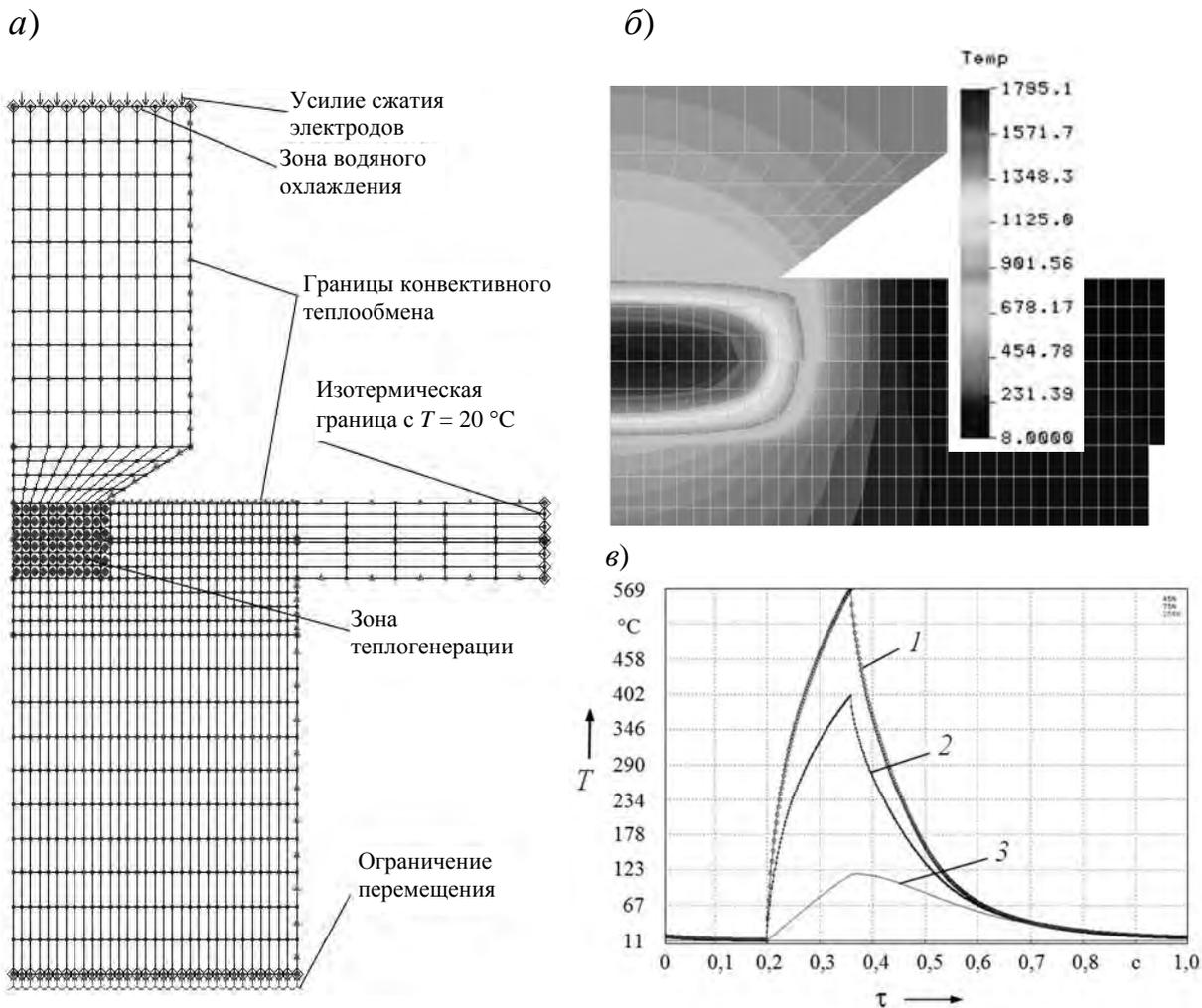
Глубина вмятин от электродов зависит от температуры свариваемого металла в зоне контакта электрод–деталь. Проведенные исследования с применением математического моделирования [4, 161–164] показали, что она значительно снижается при использовании жестких режимов сварки, зависит от величины сварочного и ковочного усилий, начального зазора между свариваемыми деталями, размеров контактной поверхности электродов и температуры нагрева. Даже самый поверхностный анализ кривых $\sigma_T = f(T)$ показывает, что для уменьшения глубины вмятин при сварке низкоуглеродистых сталей максимальная температура в контакте электрод–деталь со стороны лицевой поверхности не должна превышать 250 °С.

При односторонней двухточечной сварке и использовании многоэлектродных машин один из электродов изготавливают с увеличенной рабочей поверхностью. Применение такого электрода на протяжении определенного времени позволяет значительно уменьшать вмятину с лицевой стороны изделия [4]. С целью изучения процессов, протекающих при применении с лицевой стороны изделия электрода с увеличенной рабочей поверхностью, была построена математическая модель процесса сварки (рисунок 3.9, а) [165].

Распределение температурного поля при сварке деталей из низкоуглеродистой стали 08пс толщиной 1,5 + 1,5 мм показано на рисунке 3.9, в. Основные параметры режима: $I_{СВ} = 12$ кА; $\tau_{СВ} = 0,16$ с; $F_{СВ} = 3,5$ кН; диаметр контактной поверхности верхнего электрода $d_{\text{э}} = 6$ мм. На модели к торцу верхнего электрода из бронзы марки БрХЦр приложено распределенное усилие сжатия, а торец электрода с увеличенной рабочей поверхностью неподвижно закреплен. По этим же границам задается зона водяного охлаждения. Зона



теплогенерации ограничена размерами площади контакта электрода с верхней деталью. Лицевая поверхность соединения располагается со стороны нижнего электрода.



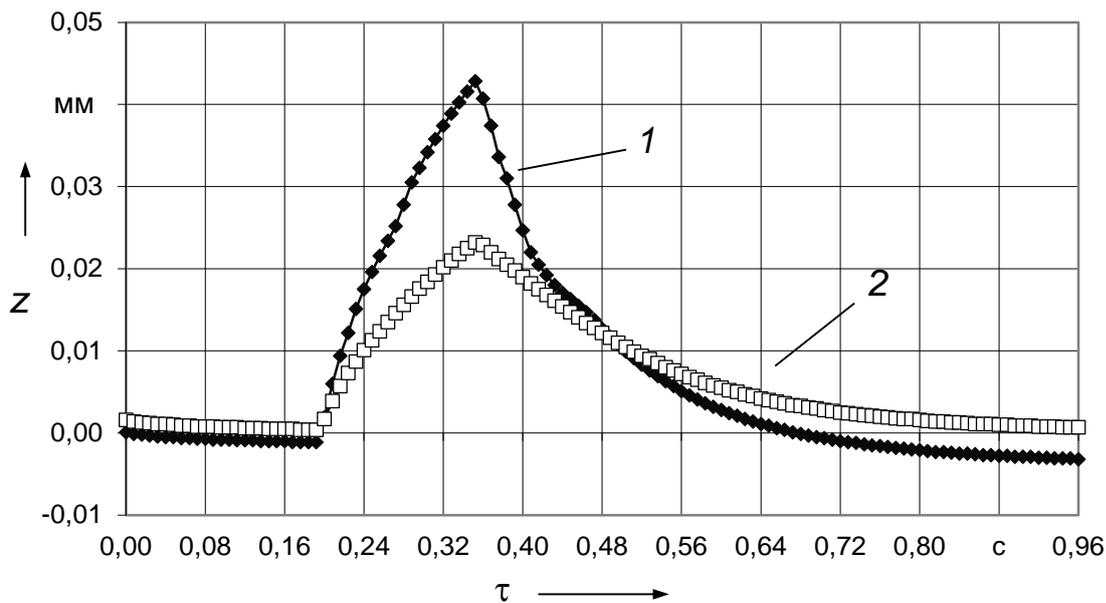
a – математическая модель процесса; *б* – распределение температурного поля; *в* – температура поверхности электрода с увеличенной площадью контакта; 1 – в центре контакта электрод–деталь; 2 – на расстоянии $r = 2,5$ мм от центра; 3 – на границе электрода

Рисунок 3.9 – Точечная сварка с применением электрода с увеличенной площадью контакта

При данном способе сварки существенно изменяются условия нагрева за счет снижения плотности тока со стороны электрода с большей рабочей поверхностью. Значительно увеличивается теплоотвод в этот электрод, поэтому происходит некоторое смещение центра литого ядра относительно границы контакта деталь–деталь (рисунок 3.9, б). При достаточном нагреве, когда проявляется дилатометрический эффект, теплоотвод в электрод с большей поверхностью снижается. Температура поверхности электрода представлена на рисунке 3.9, в. При прохождении сварочного тока из-за большой площади

контакта он нагревается неравномерно. Максимальная температура в его центральной части может достигать 550...600 °С, а периферийная часть обычно нагревается до 100...120 °С.

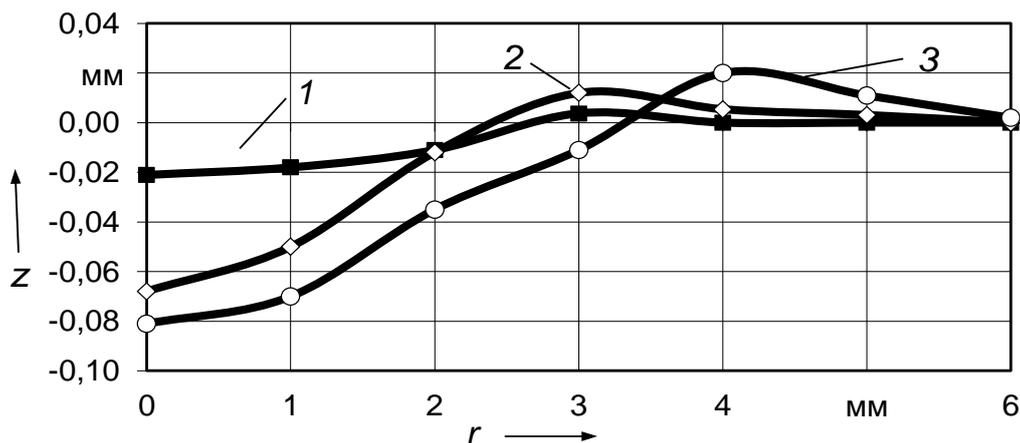
Тепловое расширение материала электрода с увеличенной рабочей поверхностью начинается в момент включения сварочного тока и длится вплоть до момента его выключения (рисунок 3.10). В связи с этим давление в зоне контакта электрод–деталь перераспределяется. В интервале температур от 500 до 600 °С начинает снижаться предел текучести бронзы и стали, вследствие чего происходит интенсивное тепловое расширение и пластическая деформация центральной части электрода и лицевой поверхности детали, примыкающей к электроду. При этом температура поверхностных слоев свариваемого металла обычно на 150...200 °С выше, чем температура поверхности электрода. Поэтому происходит образование углубления на лицевой поверхности соединения. После полного остывания деталей и усадки металла углубление может достигать 4...5 % от толщины детали.



1 – в центре контакта электрод–деталь; 2 – на границе электрода

Рисунок 3.10 – Тепловое расширение электрода с большой площадью контакта

Результаты экспериментов показали, что при дальнейшей постановке сварных точек в центральной части электрода с увеличенной площадью контакта появляется вмятина. После сварки 100 точек ее глубина составляет 0,02 мм, при постановке 500 точек – 0,08 мм (рисунок 3.11). Это является причиной образования выпуклости на лицевой поверхности изделия, высота которой по экспериментальным данным может достигать 0,01...0,03 мм (рисунок 3.12).



1 – при сварке 100 точек; 2 – 300 точек; 3 – 500 точек

Рисунок 3.11 – Износ бронзового электрода с увеличенной площадью контакта

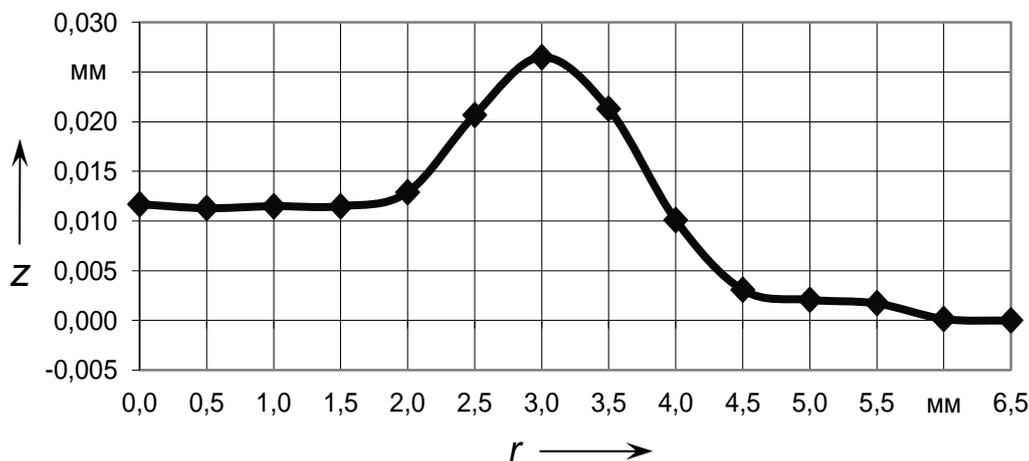


Рисунок 3.12 – Выпуклость на лицевой поверхности изделия

В связи с этим в процессе сварки необходимо постоянно следить за состоянием электрода с увеличенной рабочей поверхностью. При его износе и появлении на нем углубления происходит перераспределение плотности электрического тока в зоне контакта электрод–деталь и увеличение контактного сопротивления, что приводит к изменению условий теплоотвода и смещению литого ядра относительно плоскости контакта свариваемых деталей. Это особенно сказывается на снижении прочности соединений при сварке разнородных материалов и деталей неравной толщины. Практика показала, что для получения качественного соединения в таких случаях необходимо увеличивать усилие сжатия электродов.

С целью поиска путей регулирования напряженно-деформированного состояния металла зоны соединения и уменьшения износа электрода с увеличенной рабочей поверхностью был промоделирован процесс сварки с применением со стороны лицевой поверхности изделия тугоплавких вставок в

электрод [162]. В качестве вставки может использоваться либо дисперсно-упрочненная медь [166], либо износостойкие бронзы [167], обладающие, по сравнению с бронзой БрХЦр, повышенными технологическими свойствами. Применение вставки в электрод позволяет снизить глубину вмятины на лицевой поверхности до 1,5...3 % от толщины детали (при сварке без вставки она составляет 4...5 %).

Макрошлиф сварного соединения из стали Ст3 толщиной 1,5 + 1,5 мм при сварке со вставкой ($\tau_{CB} = 0,2$ с; $I_{CB} = 14,5$ кА; $F_{CB} = 4000$ Н; $\tau_{КОВ} = 0,6$ с) представлен на рисунке 3.13. Применение вставок из сплавов с повышенными прочностными характеристиками позволяет не только уменьшить глубину вмятины, но и увеличить работоспособность электродов за счет снижения износа их центральной части.

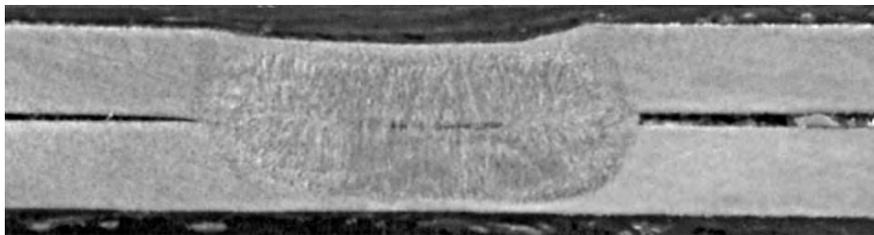


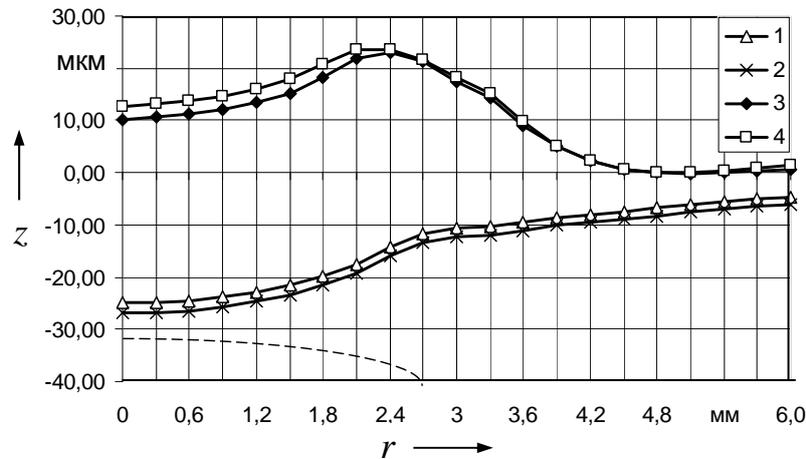
Рисунок 3.13 – Макрошлиф сварного соединения из стали Ст3 толщиной 1,5 + 1,5 мм при применении вставки из дисперсно-упрочненной меди в центральной части электрода

Снизить деформации лицевых поверхностей изделий и износ электродов можно за счет улучшения условий охлаждения электродов. Это приводит к уменьшению величины температурного расширения материала электрода в его центральной части.

Влияние температуры охлаждения электрода с увеличенной площадью контакта на характер деформирования лицевой поверхности детали показано на рисунке 3.14. При охлаждении торца электрода до 8 и 22 °С (кривые 1, 2) на лицевой поверхности детали образуется вмятина глубиной 25...27 мкм. При полном охлаждении электрода до 8 и 22 °С на лицевой поверхности появляется выпуклость высотой 20...25 мкм (кривые 3, 4). Таким образом, интенсивность охлаждения электродов оказывает существенное влияние на характер деформирования поверхностей деталей.

Экспериментальная проверка результатов математического моделирования производилась на установке для контактной точечной сварки SEMSA ROOF на заводе «Могилевлифтмаш». В качестве электрода с лицевой стороны соединения использовался бронзовый водоохлаждаемый стол с большой рабочей поверхностью. Для интенсивного охлаждения электродов применялась автономная холодильная установка. Образцы из низкоуглеродистой стали 08пс толщиной 1,5 + 1,5 мм сваривались при следующих параметрах режима:

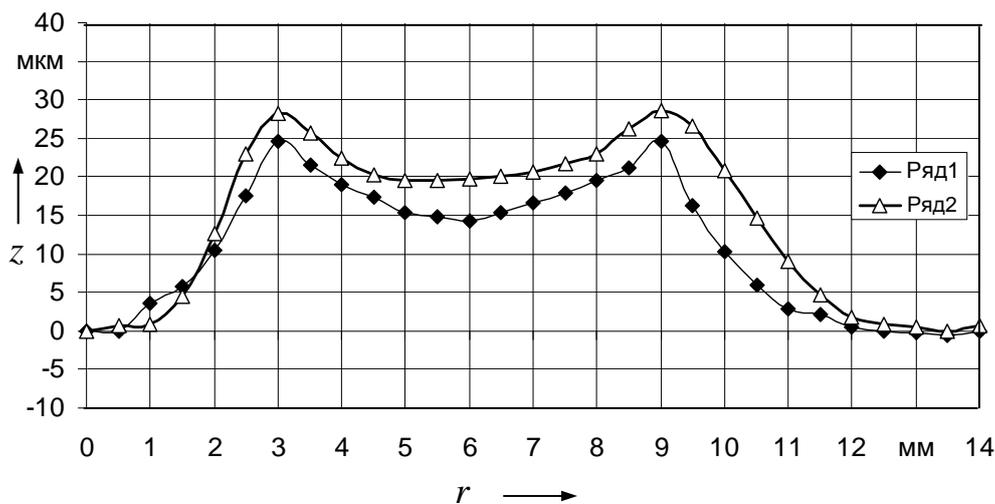
$I_{CB} = 12$ кА; $\tau_{CB} = 0,16$ с; $F_{CB} = 3,5$ кН; диаметр контактной поверхности электрода $d_{\text{Э}} = 6$ мм.



1, 2 – при охлаждении торцов электродов до 8 и 22 °С; 3, 4 – при полном охлаждении электродов до 8 и 22 °С

Рисунок 3.14 – Влияние условий охлаждения электрода с увеличенной площадью контакта на характер деформирования поверхности детали

Зависимость величин выпуклости на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта представлена на рисунке 3.15. Электроды охлаждались до температур 8 и 22 °С. Макрошлифы сварных соединений, полученных при сварке с охлаждением электродов до температур 8 и 22 °С, представлены на рисунке 3.16. С повышением температуры охлаждения глубина проплавления h и диаметр сварной точки $d_{\text{я}}$ возрастают [165].



1 – при температуре охлаждения электродов 8 °С; 2 – 22 °С

Рисунок 3.15 – Выпуклость на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта

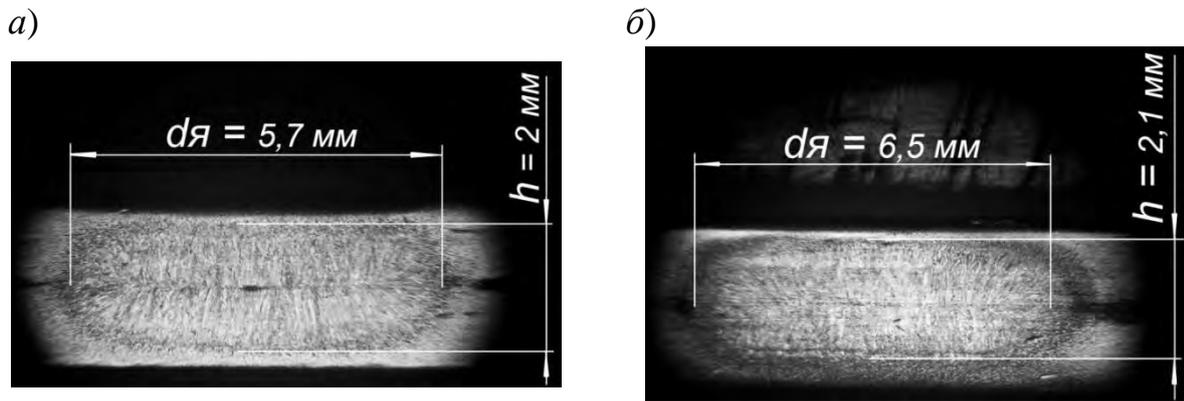


Рисунок 3.16 – Макрошлифы соединений при точечной сварке стали 08пс толщиной 1,5 + 1,5 мм с охлаждением электродов до температур 8 °С (а) и 22 °С (б)

При снижении температуры охлаждения электродов от 22 до 8 °С высота выпуклости на лицевой поверхности створок дверей лифта уменьшилась на 25 % и составила 15...25 мкм. При этом обеспечиваются требуемый диаметр литого ядра и глубина проплавления и не требуется применение шлифовки лицевых поверхностей перед их покраской.

3.3 Влияние термдеформационного цикла сварки с обжатием периферийной зоны соединения на деформации лицевых поверхностей изделий и прочность сварного соединения

Известны способы точечной сварки с программируемым обжатием периферийной зоны соединения [168–171]. Проведенные исследования показали, что данный способ может эффективно использоваться для снижения деформаций на лицевых поверхностях изделий при точечной сварке [163, 172, 173].

Результаты проведенного моделирования процесса сварки образцов из стали 08пс толщиной 1,0 + 1,0 мм подтвердили, что данный способ существенно изменяет условия пластической деформации в зоне сварного соединения. Для расчета использовалась циклограмма процесса сварки с обжатием периферийной зоны соединения, представленная на рисунке 3.17. Параметры процесса сварки: $I_{св} = 13$ кА; $\tau_{св} = 0,16$ с; $F_{сж} = F_{св} = 3900$ Н; $\tau_{сж} = 0,2$ с; $F_{обж} = F_{ков} = 3500...6650$ Н; $\tau_{ков} = 0,6$ с; диаметр рабочей части верхнего электрода $D_{э} = 16$ мм; внутренний $d_{пв}$ и наружный $d_{пн}$ диаметры кольцевого пуансона 17 и 20 мм соответственно.

В отличие от обычной точечной сварки усилие $F_{обж}$, прикладываемое к периферийной зоне сварной точки, препятствует раскрытию зазора в нахлестке, и сопротивление пластическому течению металла в зазор значительно возрастает. Постоянно действующее обжимающее усилие затрудняет раскрытие зазора в области пластического пояса даже при неблагоприятных изменениях

параметров режима сварки и позволяет увеличить максимальный диаметр литого ядра без образования выплеска. По сравнению с аналогичным режимом для двусторонней сварки это способствует также применению еще более жестких режимов сварки, однако сварочный ток вместе с тем должен быть увеличен на 20...25 % в связи с ростом площади контакта деталь–деталь после приложения усилия обжатия [174]. Сглаживание внутреннего рельефа в зоне пояса неизбежно уменьшает плотность тока в контакте деталь–деталь, однако создает более стабильную площадь проводимости, которая в меньшей степени зависит от параметров режима и различных возмущающих факторов.

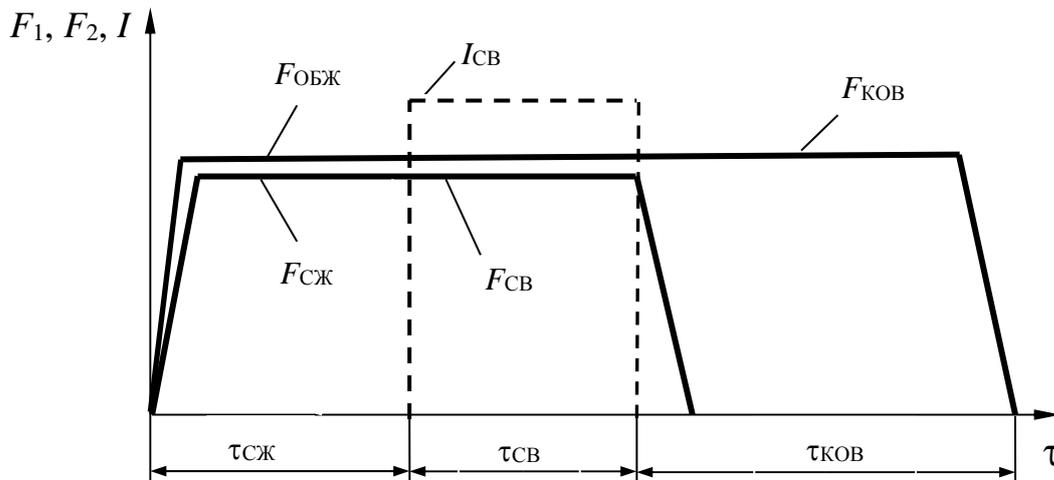


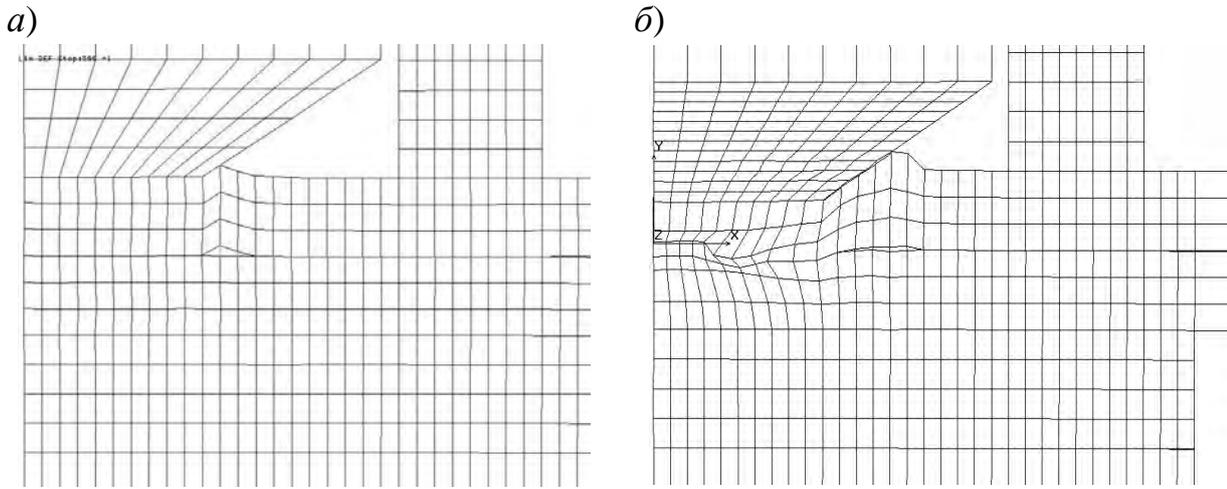
Рисунок 3.17 – Циклограмма процесса контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения

При приложении усилия обжатия $F_{\text{ОБЖ}}$ зоной с наименьшим сопротивлением пластической деформации оказывается участок верхней детали между электродом и пуансоном, зажатый с двух сторон. В результате таких условий закрепления при пропускании сварочного тока под действием теплового расширения металла данный участок испытывает упругопластическую деформацию (рисунок 3.18, а), причем пластическое деформирование происходит непосредственно вблизи электрода. Далее разогретый металл выдавливается из-под электрода в эту зону с образованием вокруг отпечатка на поверхности детали кольцевого буртика (рисунок 3.18, б) [48].

Кинетика образования вмятины при сварке деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 1 + 1 мм с обжатием периферийной зоны соединения со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью представлена на рисунке 3.19.

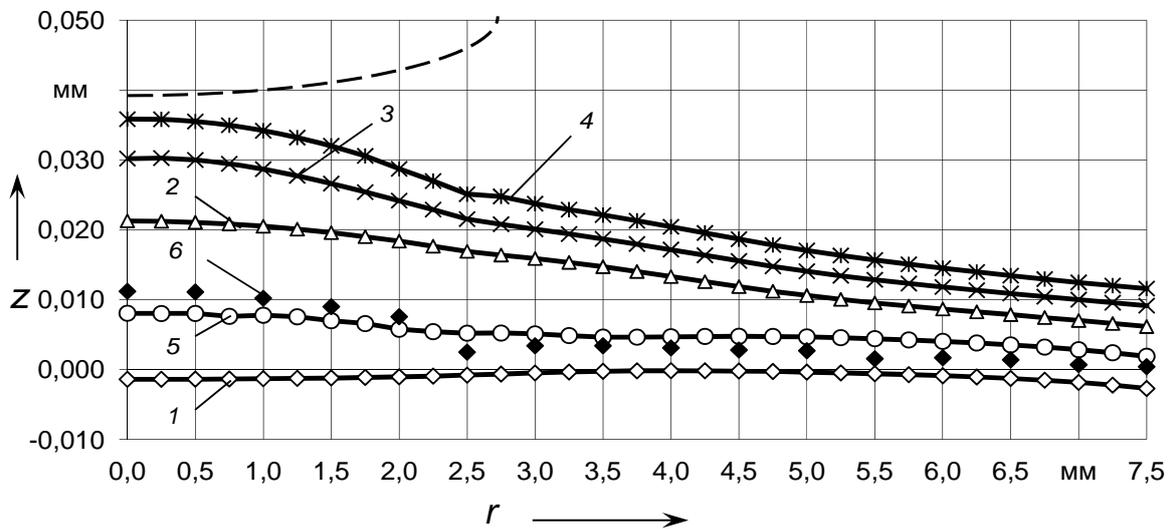
По сравнению со сваркой без обжатия при приложении усилия обжатия к периферийной зоне происходит снижение глубины вмятин на 40...50 % со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью. Углубление на

поверхности детали со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью после проковки при этом составляет лишь 0,5...2 % от толщины детали.



a – упругопластический прогиб металла в зоне между электродом и пуансоном;
б – образование буртика

Рисунок 3.18 – Деформационная картина точечного соединения при сварке с обжатием периферийной зоны



1 – $\tau_{СЖ} = 0,2$ с; 2 – $\tau_{СВ} = 0,08$ с; 3 – $\tau_{СВ} = 0,12$ с; 4 – $\tau_{СВ} = 0,16$ с; 5 – $\tau_{КОВ} = 0,4$ с;
 б – экспериментальные данные

Рисунок 3.19 – Кинетика образования вмятины при сварке с обжатием периферийной зоны соединения со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью

Данные экспериментальных исследований (рисунок 3.19, линия б) подтвердили, что разработанная модель термомодеформационного цикла сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволяет с достаточно высокой

достоверностью проследить кинетику образования вмятин. Так, при сварке серии образцов на тех же режимах углубление на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта после проковки составило 1,2 % от толщины детали.

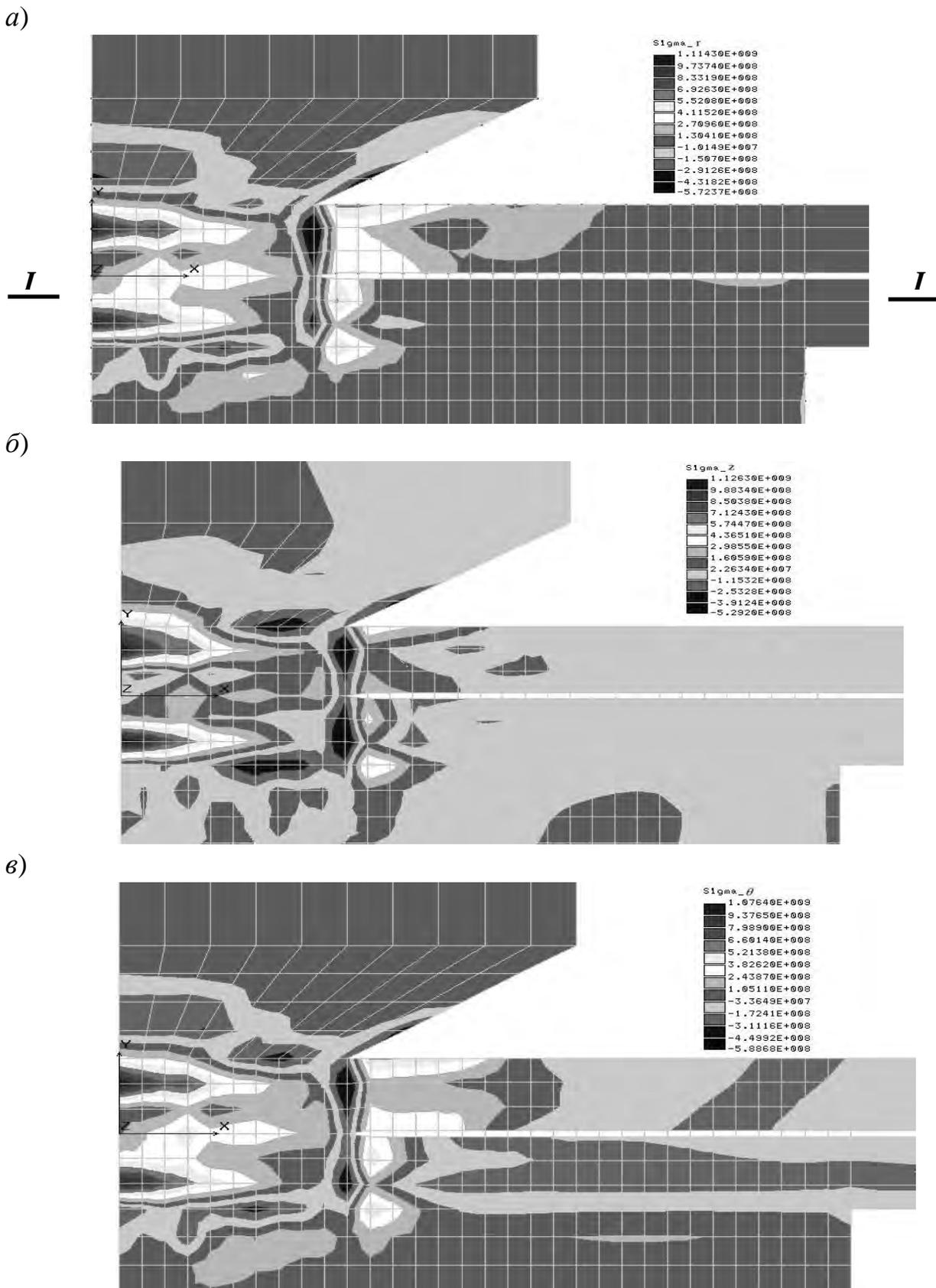
В ходе экспериментов было также установлено, что применение обжатия периферийной зоны позволяет после выключения сварочного тока исключить проковку посредством электродов, что улучшает условия их охлаждения и уменьшает интенсивность износа (см. рисунок 3.17). Известно, что при контактной точечной сварке преждевременное снятие ковочного усилия $F_{\text{КОВ}}$ с электродов приводит к существенному ухудшению прочностных свойств соединений. Это связано с образованием в зоне сварки значительных растягивающих напряжений. Влияние процесса обжатия периферийной зоны соединения на прочность сварного соединения заключается в том, что приложение $F_{\text{КОВ}}$ к кольцевому пуансону существенно меняет картину распределения остаточных напряжений в зоне соединения.

Картины распределения остаточных напряжений при сварке пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 1 + 1 мм с использованием электрода с увеличенной рабочей поверхностью и при сварке с обжатием периферийной зоны показаны на рисунках 3.20 и 3.21.

Термодеформационный цикл точечной сварки в первом случае приводит к образованию в соединении сложного объемного напряженного состояния, для которого характерно наличие значительных градиентов напряжений как в радиальном, так и в осевом направлении. Наибольшие градиенты напряжений имеют место в районе пересечения границы литого ядра и внутренней поверхности листа. В указанных зонах все три компоненты нормальных напряжений являются сжимающими, в то время как основная часть металла межэлектродного пространства подвержена воздействию растягивающих напряжений [29, 175].

Распределение остаточных напряжений по сечению I-I после остывания сварной точки показано на рисунке 3.22. При охлаждении точки наблюдается значительное возрастание сжимающих осевых $\sigma_z = -230$ МПа, радиальных $\sigma_r = -370$ МПа и тангенциальных $\sigma_\theta = -390$ МПа напряжений в зоне пересечения границы литого ядра и внутренней поверхности листа (радиус сварной точки $r = 2,5$ мм). Эти напряжения, наличие которых обусловлено действием ковочного усилия, передаваемого электродами сварочной машины, существенно не меняются вплоть до полного остывания точки и оказывают благоприятное влияние на прочностные характеристики сварного соединения. Однако в зоне пластического пояса ($r = 2,75$ мм) наблюдается значительный рост уровня растягивающих напряжений. Пиковые значения радиальных напряжений σ_r достигают 600 МПа, осевых – $\sigma_z = 370$ МПа, тангенциальных – $\sigma_\theta = 500$ МПа.

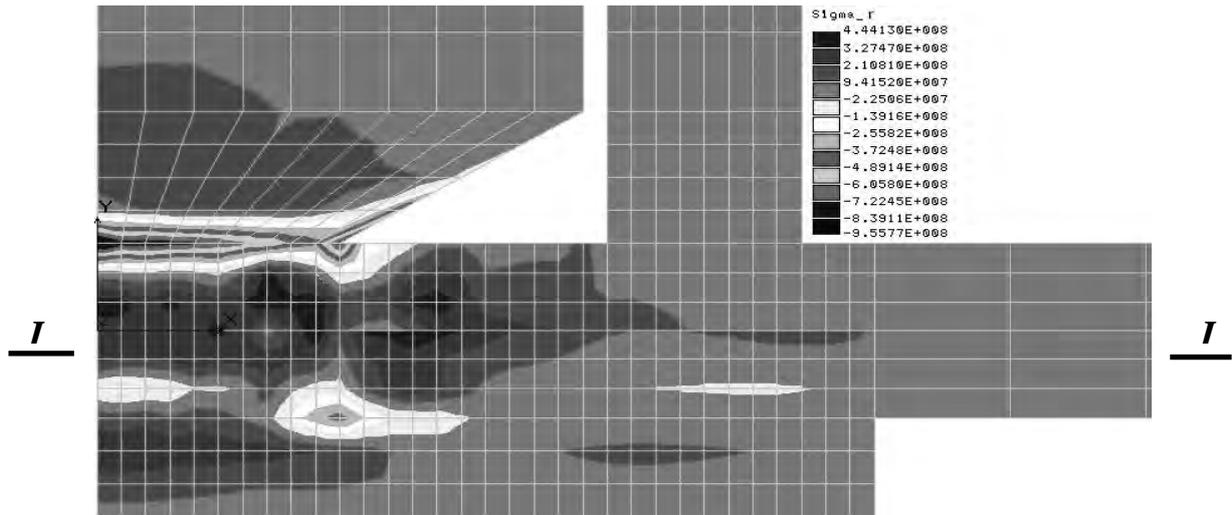




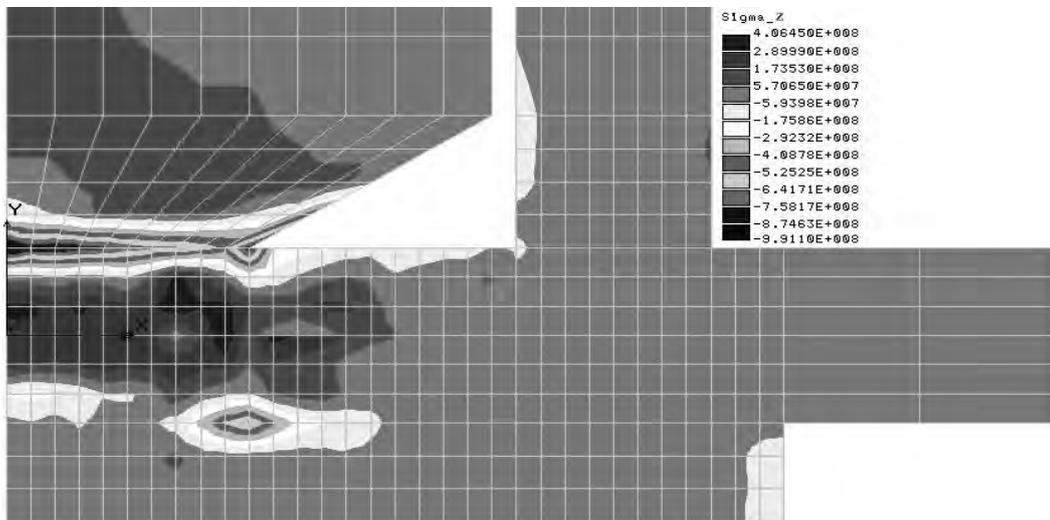
a – радиальных; *б* – осевых; *в* – тангенциальных

Рисунок 3.20 – Распределение остаточных напряжений на стадии остывания соединения при сварке с использованием электрода с увеличенной площадью контакта

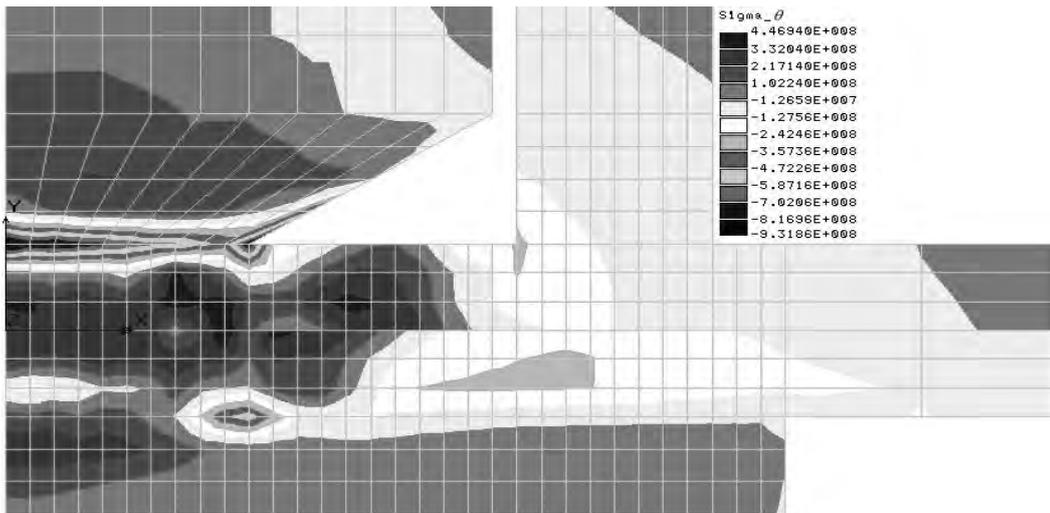
а)



б)



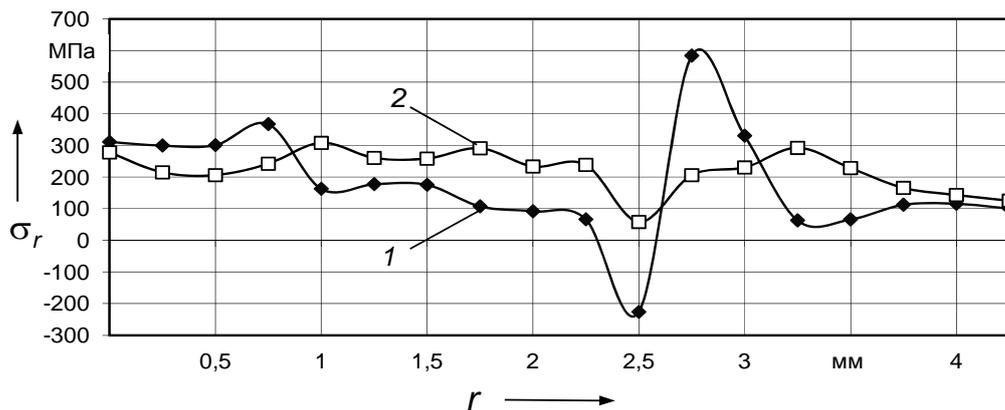
в)



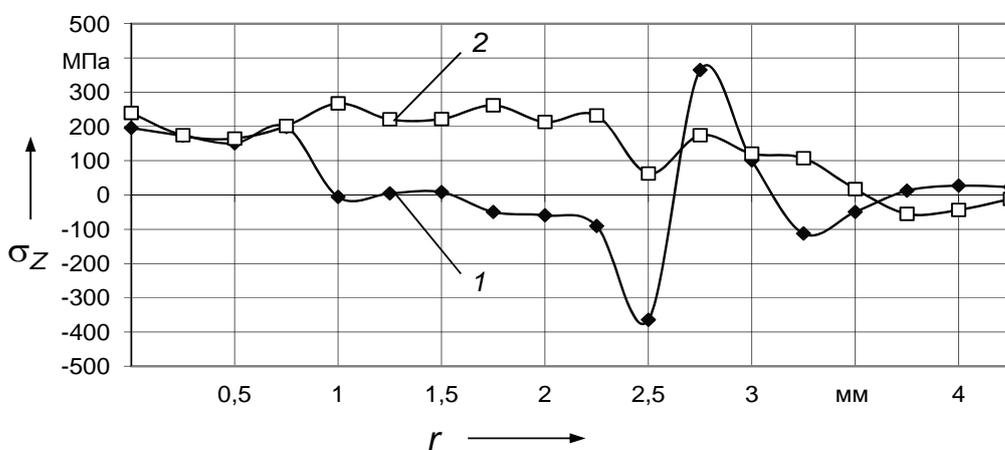
а – радиальных; б – осевых; в – тангенциальных

Рисунок 3.21 – Распределение остаточных напряжений на стадии остывания сварной точки при сварке с обжатием периферийной зоны соединения

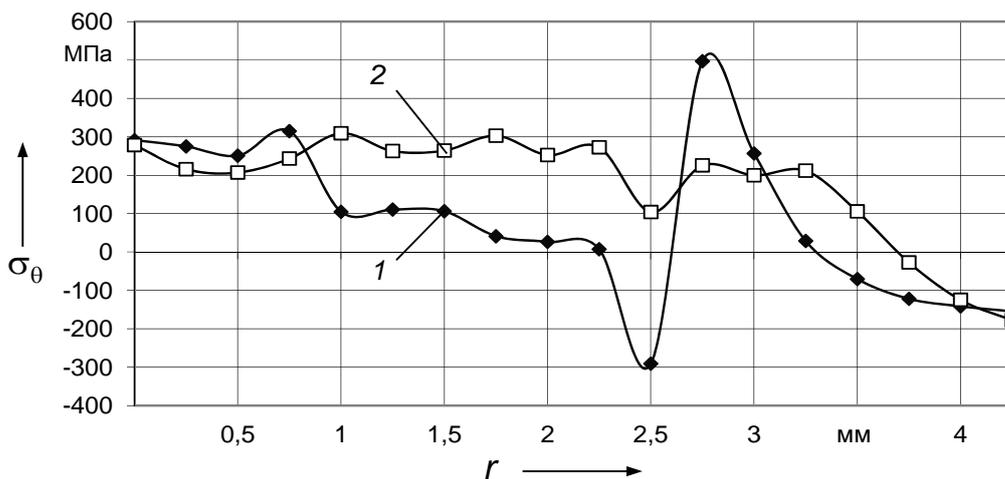
a)



б)



в)



a – радиальных; $б$ – осевых; $в$ – тангенциальных; 1 – при применении электрода с увеличенной рабочей поверхностью; 2 – при обжатии периферийной зоны соединения

Рисунок 3.22 – Распределение остаточных напряжений по сечению I-I после остывания сварной точки

Применение обжатия как на стадии нагрева, так и на стадии охлаждения сварного соединения и приложение усилия проковки к периферийной зоне коренным образом меняет картину распределения осевых, радиальных и тангенциальных напряжений в области сварной точки и в зоне пластического пояса (см. рисунки 3.21 и 3.22). При этом в области контакта верхний электрод–деталь также формируются значительные сжимающие напряжения, однако на границе литого ядра ($r = 2,5$ мм) появляются растягивающие, что обусловлено снятием усилия проковки с токоподводящего электрода. Это ведет также к повышению величины растягивающих напряжений и в самой зоне литого ядра. Повышение прочности соединения в таком случае достигается значительным уменьшением пика растягивающих напряжений в зоне пластического пояса, что связано с воздействием на нее усилия обжатия. Данная зона является ответственной за прочность сварного соединения, так как именно в ней происходит зарождение усталостных трещин и разрушение сварного соединения при прочностных испытаниях. Значения растягивающих напряжений в зоне пластического пояса при сварке с обжатием не превышают 200 МПа.

Общая картина распределения напряжений показывает, что при сварке с обжатием периферийной зоны в металле межэлектродного пространства создается напряженно-деформированное состояние, препятствующее деформации в радиальном и осевом направлениях и увеличивающее сопротивление пластическому течению металла из зоны сварного соединения к периферии сварной точки. Таким образом, применение обжатия периферийной зоны повышает эффективность операции проковки.

Проведены статические прочностные испытания сварных соединений образцов из низкоуглеродистой стали 08кп толщиной 1 + 1 мм, выполненных по различным циклограммам процесса сварки. Результаты испытаний сварных соединений на разрыв представлены в таблице 3.1. Разрушение образцов происходило по периферии сварной точки.

Образцы с номерами 1...10 сваривались по циклограмме двусторонней точечной сварки без обжатия (см. рисунок 3.1). Параметры режима сварки: $I_{СВ} = 11$ кА; $\tau_{СВ} = 0,2$ с; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 3000$ Н; среднее усилие на отрыв $F_{ОТР} = 7690$ Н; средний диаметр ядра $d_{Я} = 6,11$ мм.

Образцы с номерами 11...20 сваривались по циклограмме сварки с обжатием периферийной зоны соединения при сварочном усилии $F_{СВ} = 3000$ Н и ковочном усилии обжатия $F_{КОВ} = F_{ОБЖ} = 3000$ Н (см. рисунок 3.17). Параметры режима: $I_{СВ} = 13$ кА; $\tau_{СВ} = 0,2$ с; $\tau_{КОВ} = 0,4$ с; среднее усилие на отрыв $F_{ОТР} = 7975$ Н; средний диаметр ядра $d_{Я} = 5,53$ мм.

Образцы с номерами 21...30 сваривались по той же циклограмме (см. рисунок 3.17) при $F_{СВ} = 3000$ Н и повышенном ковочном усилии обжатия $F_{КОВ} = F_{ОБЖ} = 6000$ Н. Среднее усилие на отрыв составило $F_{ОТР} = 8580$ Н; средний диаметр ядра $d_{Я} = 5,3$ мм.



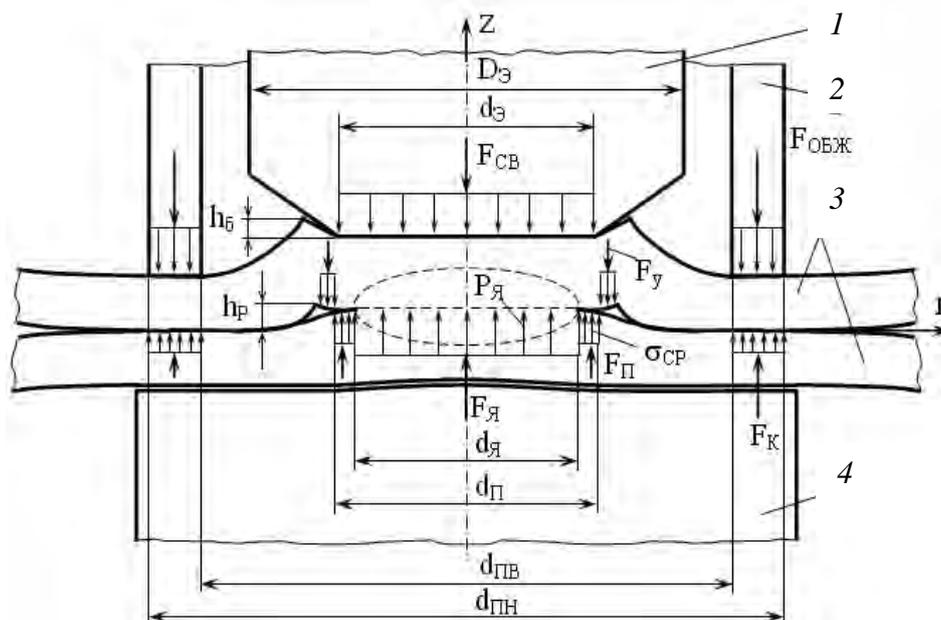
Таблица 3.1 – Результаты испытаний сварных соединений на прочность

Номер образца	Усилие на отрыв $F_{отр}$, Н	Диаметр ядра d_j , мм	Номер образца	Усилие на отрыв $F_{отр}$, Н	Диаметр ядра d_j , мм	Номер образца	Усилие на отрыв $F_{отр}$, Н	Диаметр ядра d_j , мм
1	7400	6,1	11	7500	6,25	21	8300	4,95
2	7600	6,1	12	8300	5,75	22	8000	4,7
3	7300	6,0	13	8100	4,9	23	8600	6,2
4	7600	6,2	14	8100	5,3	24	9000	5,25
5	8100	6,8	15	7250	5,5	25	9000	6,1
6	7300	7,0	16	8500	6,1	26	8800	5,6
7	7300	5,9	17	8500	5,9	27	8800	5,25
8	7700	6,1	18	7400	5,85	28	8500	4,5
9	8400	5,3	19	8200	4,95	29	8100	5,3
10	8200	5,6	20	7900	4,8	30	8700	5,2
Среднее значение	7690	6,11		7975	5,53		8580	5,3

Проведенный анализ показал, что способ контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволяет не только значительно уменьшить деформации лицевых поверхностей изделий, но и повысить прочность соединений. Снятие $F_{ков}$ с токоподводящего электрода и приложение его к кольцевому пуансону приводит к улучшению прочностных показателей соединения, связанному с уменьшением величины остаточных радиальных, осевых и тангенциальных напряжений в зоне пластического пояса сварной точки. Применение обжатия позволяет повысить статическую прочность точечных соединений на 10...25 %.

3.4 Расчет параметров силового воздействия на детали при сварке с обжатием периферийной зоны

Отличительной особенностью процесса формирования точечного соединения при сварке с обжатием периферийной зоны соединения является возникновение пластического прогиба металла в зоне между электродом и пуансоном при нагреве и образование буртика высотой h_b (рисунок 3.23) [4, 176]. Прогиб детали, расположенной со стороны действия верхнего электрода и пуансона, происходит вследствие теплового расширения и формирования рельефа высотой h_p в периферийной зоне контакта свариваемых деталей. При этом в области обжатия деталей пуансоном образуется отдельный замкнутый контакт, внутренняя граница которого находится вне зоны пластического пояса.



1 – подвижный электрод; 2 – пуансон; 3 – свариваемые детали; 4 – электрод с увеличенной рабочей поверхностью

Рисунок 3.23 – Схема равновесия замкнутой силовой системы при сварке с обжатием периферийной зоны

Равновесие замкнутой силовой системы электрод–свариваемые детали–электрод–пуансон, имеющей при сварке одну степень свободы – перемещение по оси электродов z , в цилиндрической системе координат может быть описано следующим уравнением [176, 177]:

$$\begin{aligned}
 & F_{\text{я}} + F_{\text{п}} + F_{\text{к}} + F_{\text{д}} - (F_{\text{св}} + F_{\text{обж}}) = \\
 & = P_{\text{я}} \frac{\pi d_{\text{я}}^2}{4} + \sigma_{\text{ср}} \pi \frac{d_{\text{п}}^2 - d_{\text{я}}^2}{4} + F_{\text{к}} + F_{\text{д}} - (F_{\text{св}} + F_{\text{обж}}) = 0,
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $d_{\text{п}}$ – диаметр пластического пояса сварной точки, мм;

$d_{\text{я}}$ – диаметр литого ядра сварной точки, мм;

$\sigma_{\text{ср}}$ – среднее значение напряжений в зоне пластического пояса, Па;

$F_{\text{к}}$ – усилие, действующее по площади кольцевого контакта деталь–деталь в зоне приложения $F_{\text{обж}}$, Н;

$F_{\text{д}}$ – усилие, необходимое для деформации деталей при их сближении до соприкосновения, Н;

$F_{\text{обж}}$ – усилие обжатия кольцевым пуансоном, Н;

$F_{\text{св}}$ – усилие сжатия электродов при сварке, Н;

$F_{\text{п}}$ – усилие, действующее в зоне пластического пояса, Н;

$P_{\text{я}}$ – гидростатическое давление расплавленного металла ядра, Па;

$F_{\text{я}}$ – усилие, вызванное давлением расплавленного металла ядра, Н.

Величина усилия $F_{\text{д}}$, противодействующего сварочному усилию, при начальных зазорах между деталями 0,1...0,5 мм не превышает 0,5...2 % от сварочного усилия $F_{\text{св}}$. По этой причине величина усилия $F_{\text{д}}$ в процессе формирования соединения не оказывает существенного влияния на расчет $F_{\text{св}}$ и может не учитываться.

Уравнение равновесия (3.1) описывает процесс формирования соединения при сварке и связывает параметры нагрева, плавления, величины нормальных составляющих напряжений в зоне пластического пояска в контактах электрод–деталь и пуансон–деталь с величинами усилий $F_{\text{св}}$ и $F_{\text{обж}}$. По данному уравнению может быть рассчитано суммарное усилие $F_{\Sigma} = F_{\text{св}} + F_{\text{обж}}$, действующее на нижний электрод с увеличенной площадью контакта.

Для определения усилия обжатия $F_{\text{обж}}$ участок верхней детали, расположенный между электродом и пуансоном, приближенно рассматривался как круглая пластина, жестко зашпеченная в области действия силового пуансона, с отверстием в зоне расплавленного ядра. При этом, исходя из условия равновесия кольцевого элемента вне зоны ядра, усилие $F_{\text{обж}}$ может быть найдено по следующей формуле [176]:

$$\begin{aligned} F_{\text{обж}} &= F_{\text{к}} + F_{\text{п}} + F_{\text{у}} = (0,05...0,1)F_{\text{я}} + (1,5...2,1)F_{\text{п}} = \\ &= (0,05...0,1)P_{\text{я}} \frac{\pi d_{\text{я}}^2}{4} + (1,5...2,1)\sigma_{\text{ср}}\pi \frac{d_{\text{п}}^2 - d_{\text{я}}^2}{4}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $F_{\text{у}}$ – часть усилия $F_{\text{обж}}$, передаваемого от кольцевого пуансона за счет упругого деформирования детали в зону пластического пояска.

При этом значения $P_{\text{я}}$ и $\sigma_{\text{ср}}$ с учетом того, что все величины изменяются во времени, могут быть определены по известным формулам [1].

В отличие от формулы, предложенной в [177], при определении $F_{\text{обж}}$ учитывалось усилие $F_{\text{п}}$, действующее в зоне пластического пояска сварной точки. Это позволило пересчитать параметры силового воздействия на детали при точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения [163, 176].

Оптимальные условия формирования соединения создаются в том случае, если при $\tau = \tau_{\text{св}}$ усилием $F_{\text{у}}$ передается не менее 50 % требуемого условием отсутствия выплеска усилия $F_{\text{п}}$. При этом усилие $F_{\text{св}}$ можно снизить на 10...15 %. Если при прогибе происходит соприкосновение деталей ($F_{\text{у}} = F_{\text{уmax}}$), то дальнейшее увеличение $F_{\text{обж}}$ обусловит только рост $F_{\text{к}}$. Чрезмерное увеличение усилия $F_{\text{обж}}$ может привести к значительному упругому деформированию нижней консоли машины и смещению осей электродов. Поэтому при соприкос-



новении деталей в зоне действия пуансона усилие F_K не должно превышать 5...10 % от суммы усилий $F_Y + F_{\Pi}$.

Максимальное усилие $F_{Y_{\max}}$ находится исходя из известного решения задачи деформации круглой пластины [177]:

$$F_{Y_{\max}} = \frac{8\pi D_1 \omega_1}{K_{\Pi}} = \frac{8\pi D_1 h_P}{K_{\Pi} (1 + D_1/D_2)}, \quad (3.3)$$

где ω_1 – прогиб детали, $\omega_1 = h_P / (1 + D_1/D_2)$;

D – цилиндрическая жесткость детали;

h_P – высота рельефа;

K_{Π} – коэффициент, учитывающий размеры силового пуансона.

Для расчета коэффициента K_{Π} используется формула [176, 177]

$$K_{\Pi} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 + \nu}{1 - \nu} (d_{\text{ПВ}}^2 - d_{\text{Я}}^2) + \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \cdot \frac{2d_{\text{ПВ}}^2 d_{\text{Я}}^2}{d_{\text{ПВ}}^2 - d_{\text{Я}}^2} \left[\ln \left(\frac{d_{\text{ПВ}}}{d_{\text{Я}}} \right) \right]^2, \quad (3.4)$$

где $d_{\text{ПВ}}$ – внутренний диаметр силового пуансона;

ν – коэффициент Пуассона.

Разработанный алгоритм расчета усилий $F_{\text{СВ}}$ и $F_{\text{ОБЖ}}$ при контактной точечной сварке с обжатием приведен на рисунке 3.24.

Для сварки с неизменным $F_{\text{ОБЖ}}$ расчет проводится при $\tau = \tau_{\text{СВ}}$, так как в этот момент времени $F_{\text{ОБЖ}}$ будет максимальным. Исходными данными для решения задачи являются толщина детали δ , среднестатистическая величина начального зазора между деталями δ_3 , время протекания сварочного тока $\tau_{\text{СВ}}$, требуемые диаметры литого ядра $d_{\text{Я}}$ и пластического пояска $d_{\text{П}}$. Если при большой жесткости деталей их соприкосновение в зоне действия пуансона отсутствует ($F_K = 0$), то по формуле (3.2) находим $F_{\text{ОБЖ}} = F_Y + F_{\Pi}$. В случае соприкосновения деталей усилие обжатия $F_{\text{ОБЖ}} = F_{Y_{\max}} + F_{\Pi} + F_K$. После расчета $F_{\text{ОБЖ}}$ по формуле (3.1) находится $F_{\text{СВ}}$.

На рисунке 3.25 приведены результаты расчета усилий $F_{\text{СВ}}$, $F_{\text{ОБЖ}}$, F_Y при контактной точечной сварке низкоуглеродистых сталей в зависимости от их толщины, требуемых размеров литого ядра $d_{\text{Я}}$ и пластического пояска $d_{\text{П}}$ при внутреннем диаметре пуансона $d_{\text{ПВ}} = 17$ мм.

При двусторонней точечной сварке должно соблюдаться динамическое равновесие между величиной усилия сжатия электродов $F_{\text{СВ}}$, средним сопротивлением пластической деформации $\sigma_{\text{СР}}$ зоны пластического пояска и количеством металла, вытесненного в зазор между деталями [1].



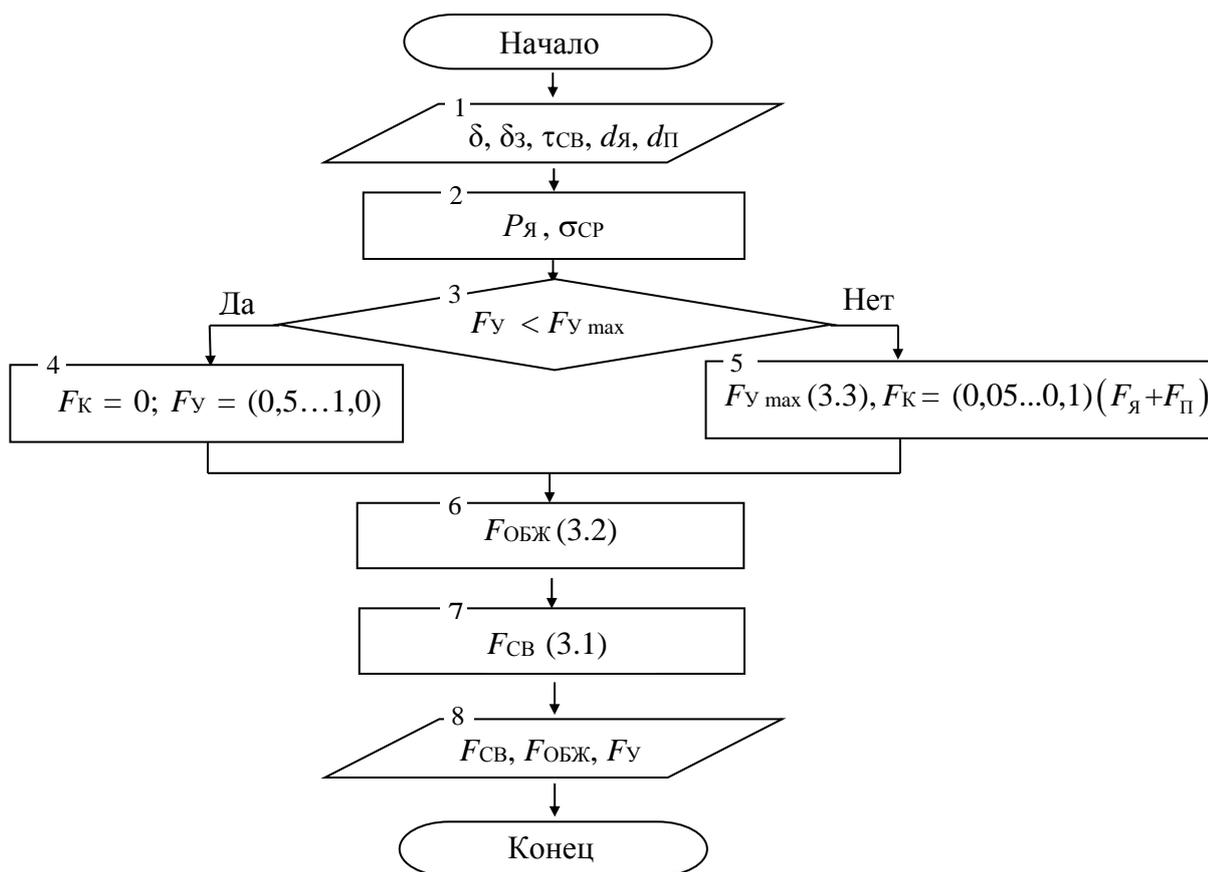


Рисунок 3.24 – Алгоритм расчета усилий F_{CB} и F_{OBJ} при сварке с обжатием периферийной зоны соединения

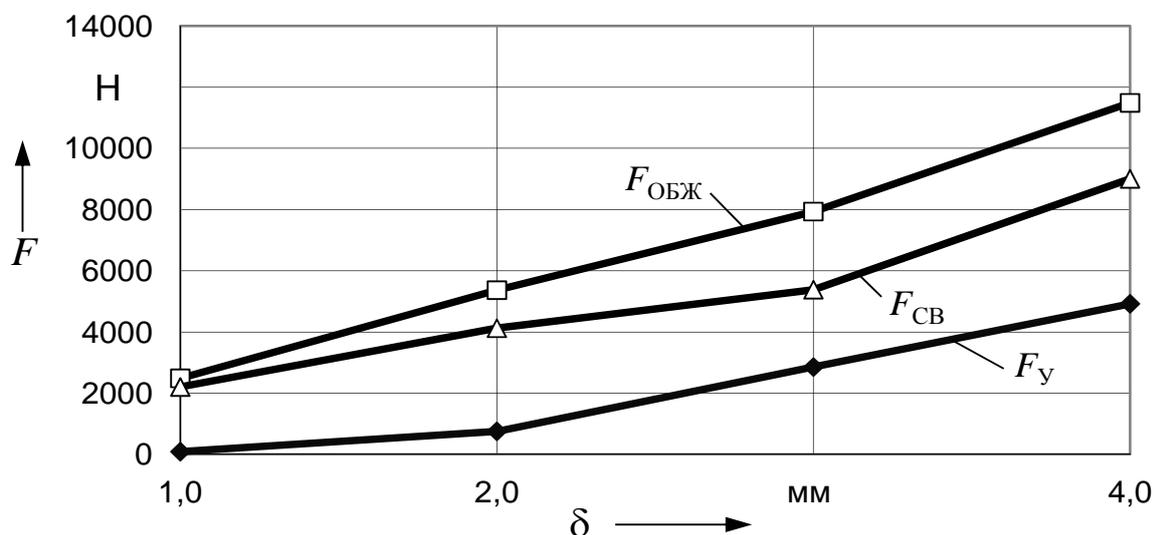


Рисунок 3.25 – Зависимости усилий F_{CB} , F_{OBJ} , $F_у$ от толщины деталей

Нарушение равновесия может приводить к быстрому росту литого ядра, увеличению давления $P_я$, разгерметизации расплавленной зоны и выплеску. Область пластических деформаций при этом локализована в объеме $V_д$, ограниченном наружными поверхностями свариваемых деталей и внешним

контуrom контакта деталь–деталь (рисунок 3.26, а). Область V_D через узкий пояс упругопластических деформаций $V_{УП}$ окружена жесткой оболочкой холодного металла $V_{ХМ}$. Вследствие теплового расширения объем V_D получает приращение V_T^* , а объем металла ядра при его расплавлении – приращение $V_{ЯТ}^*$. Выдавливание металла в зоне контакта деталь–деталь вызывает образование зазора высотой h_3 . Одновременно происходит вдавливание электродов на величины $g_{ВМ1}$ и $g_{ВМ2}$. Объем металла, вытесненный электродами $V_{Э1}^*$ и $V_{Э2}^*$, переходит в объем смещенного металла $V_{СМ}$ [153].

Как уже отмечалось, объективным критерием оценки степени деформирования поверхности детали может служить общая степень пластической деформации ε_0 (см. формулы (1.1)–(1.4)). При двусторонней точечной сварке объем смещенного металла

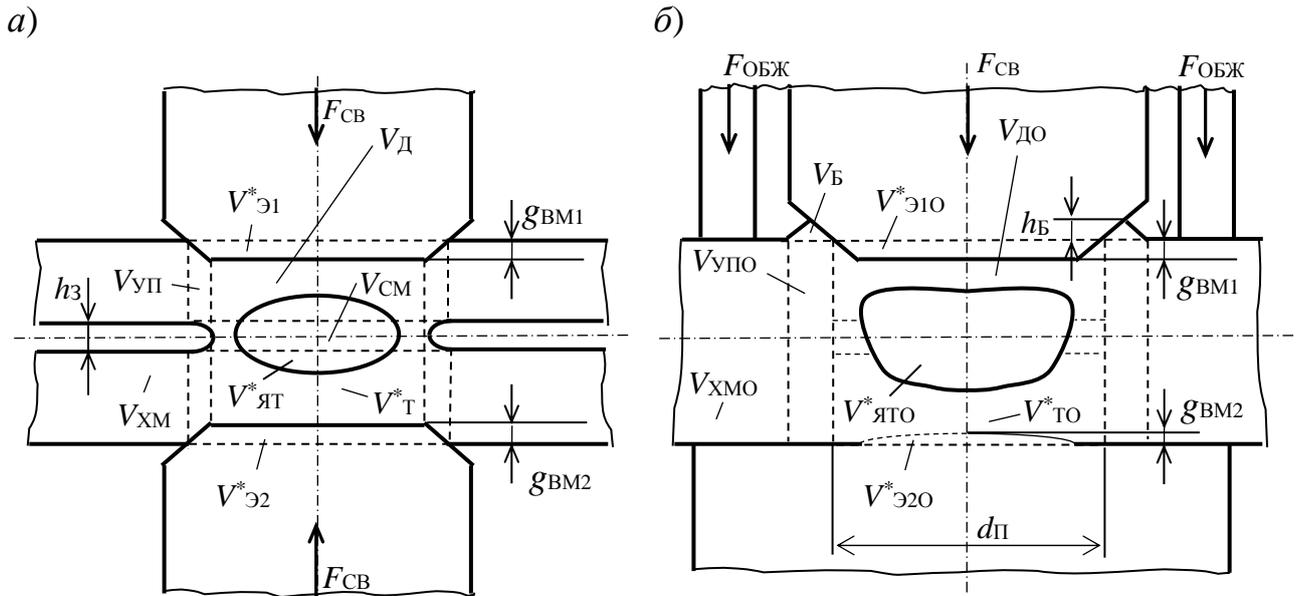
$$V_{СМ} = V_T^* + V_{ЯТ}^* + V_{Э1}^* + V_{Э2}^*. \quad (3.5)$$

При точечной сварке с обжатием периферийной зоны с перекрытием зазора под воздействием усилия $F_{ОБЖ}$ связано значительное увеличение сопротивления деформации в радиальном направлении и уменьшение вероятности появления внутреннего выплеска расплавленного металла. Однако при повышении температуры происходит тепловое расширение металла в зоне между электродом и пуансоном и, как следствие, упругопластический прогиб металла и образование рельефа h_P , что уменьшает сопротивление пластическому течению металла (см. рисунок 3.23). Полное перекрытие зазора и предотвращение выплеска может достигаться при определенном усилии $F_{ОБЖ}$, зависящем от толщины изделия, марки металла, внутреннего диаметра силового пуансона и режимов сварки. При этом пакет из двух деталей можно фактически рассматривать как одну деталь суммарной толщины, а пластическая деформация проявляется в образовании рельефа или буртика на поверхности детали. Схема зоны формирования соединения при данных допущениях приведена на рисунке 3.26, б.

Объем металла, вытесненный со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью $V_{Э20}^*$, обусловлен тепловым расширением материала электрода при сварке и втягиванием свариваемого металла при кристаллизации и усадке. В основном вытеснение металла происходит из-под электрода с нормальной рабочей поверхностью, поэтому можно считать, что $V_{Э20}^* \ll V_{Э10}^*$. Тогда объем $V_{Э10}^*$ при соблюдении условия несжимаемости вытесненного металла можно приближенно принять равным объему металла, сосредоточенного в буртике ($V_{Э10}^* = V_B$). Поэтому объем буртика V_B и его высота h_B служат критерием оценки количества вытесненного металла из зоны сварки:

$$V_{СМ} = V_{ТО}^* + V_{ЯТО}^* + V_{Э10}^* + V_{Э20}^* = V_{ТО}^* + V_{ЯТО}^* + V_B. \quad (3.6)$$





a – при двусторонней точечной сварке; *б* – при сварке с обжатием пуансоном периферийной зоны

Рисунок 3.26 – Схема зоны формирования соединения

Таким образом, при сварке с обжатием периферийной зоны регулирование напряженно-деформированного состояния с целью уменьшения глубины вмятины сводится к наибольшему снижению объема металла V_B , вытесняемого в буртик.

Усилие $F_{ОБЖ}$ будет оказывать заметное влияние на процесс формирования соединения при его увеличении до определенного значения. Оптимальная величина $F_{ОБЖ}$ будет ограничиваться усилием, при котором обеспечивается соприкосновение деталей в зоне действия силового пуансона в момент образования расплавленного ядра требуемых размеров. При этом сила, передаваемая упругопластическим прогибом в область пластического пояса, достигает своего максимального значения $F_{Уmax}$. Дальнейшее увеличение $F_{ОБЖ}$ приводит к росту площади кольцевого контакта деталь–деталь в зоне действия пуансона и усилия F_K , действующего по этой площади, что способствует существенному уменьшению плотности сварочного тока и снижению степени проплавления деталей.

Увеличение усилия $F_{ОБЖ}$, в свою очередь, согласно формулам (3.1) и (3.2), должно вести к снижению $F_{СВ}$, так как для удержания расплавленного металла от внутреннего выплеска к усилию $F_{П}$ добавляется составляющая $F_{У}$. Однако снижение $F_{СВ}$ ограничивается появлением наружного выплеска в связи с ростом сопротивления контакта электрод–деталь.

Таким образом, на основании анализа схемы равновесия замкнутой силовой системы электрод–пуансон–детали–электрод установлено, что уси-

лие $F_{\text{ОБЖ}}$ препятствует возникновению пластического течения разогретого металла из области контакта деталь–деталь в направлении периферии сварной точки, снижает вероятность образования выплеска и уменьшает на 15...20 % необходимое для качественной сварки усилие сжатия электродов. Обжатие периферийной зоны соединения способствует применению более жестких режимов сварки, чем при сварке без обжатия, за счет передачи части усилия обжатия в область пластического пояса.

3.5 Разработка технологического процесса, обеспечивающего уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий, и оборудования для его реализации

Для улучшения качества лицевых поверхностей изделий могут применяться следующие циклограммы процесса точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения (рисунок 3.27) [178].

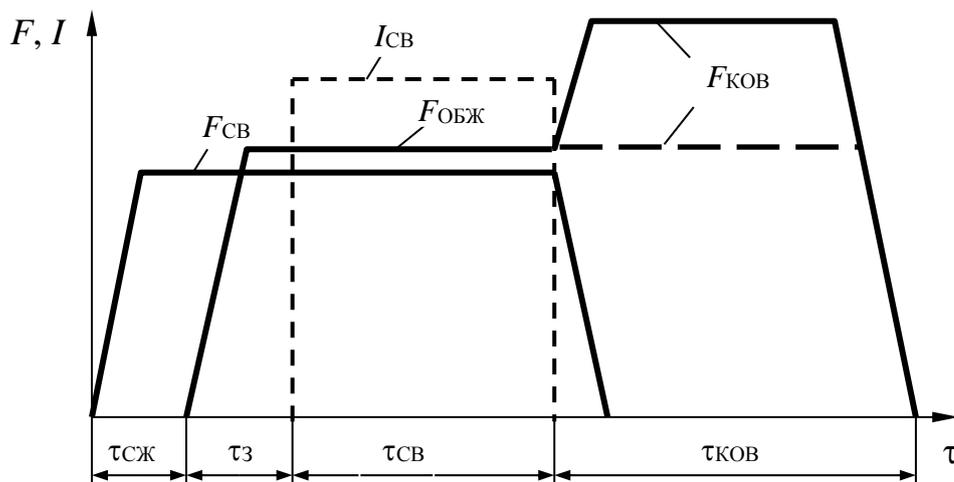
По циклограмме (см. рисунок 3.27, а) в начале цикла сварки детали в течение некоторого времени $\tau_{\text{СЖ}}$ сжимают электродами с целью образования начального контакта и стабилизации контактных сопротивлений. Усилие $F_{\text{ОБЖ}}$ прикладывается после окончания времени сжатия $\tau_{\text{СЖ}}$. Затем через время задержки τ_3 включается сварочный ток $I_{\text{СВ}}$, который действует в течение времени $\tau_{\text{СВ}}$. Время задержки τ_3 учитывает инерционность привода сжатия и обеспечивает включение $I_{\text{СВ}}$ сразу же после приложения усилия $F_{\text{ОБЖ}}$. Усилие сжатия $F_{\text{СВ}}$ с токоподводящего электрода снимается одновременно с выключением сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ в момент образования литого ядра требуемых размеров. При этом проковка периферийной зоны осуществляется только кольцевым пуансоном, к которому прикладывается усилие $F_{\text{КОВ}}$ в течение времени $\tau_{\text{КОВ}}$. Усилие $F_{\text{КОВ}}$ может оставаться равным $F_{\text{ОБЖ}}$ либо увеличиваться в 1,5...2 раза.

При сварке с дополнительным подогревом после окончания времени сжатия $\tau_{\text{СЖ}}$ через детали пропускают импульс тока подогрева $I_{\text{П}}$ в течение времени $\tau_{\text{П}}$ (см. рисунок 3.27, б). Усилие обжатия $F_{\text{ОБЖ}}$ прикладывается сразу же после выключения тока $I_{\text{П}}$. Возможна одновременная проковка электродом и кольцевым пуансоном (см. рисунок 3.27, в).

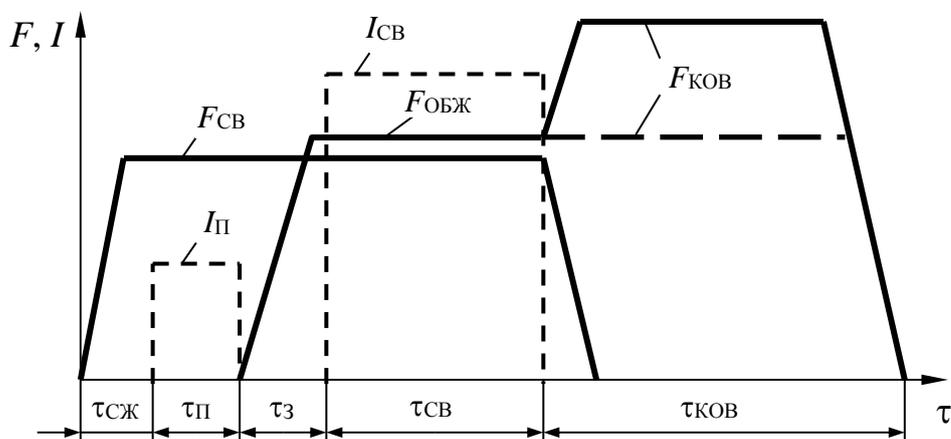
Усилие $F_{\text{СВ}}$ на стадии плавления при точечной сварке должно быть наибольшим, так как оно контролирует устойчивость процесса против образования выплеска. Обжатие периферийной зоны соединения способствует применению более жестких режимов сварки, чем при сварке без обжатия. При этом время сварки $\tau_{\text{СВ}}$ можно уменьшить на 20...30 %, что неизбежно требует увеличения $F_{\text{СВ}}$ и $I_{\text{СВ}}$.



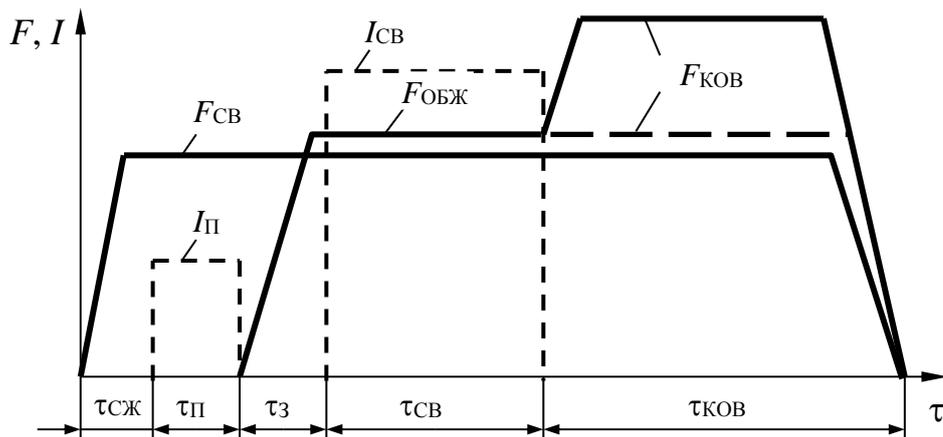
а)



б)



в)



а – с проковкой периферийной зоны пуансоном; б – с предварительным импульсом тока подогрева; в – с проковкой периферийной зоны электродом и пуансоном

Рисунок 3.27 – Циклограммы процесса контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения



Усилие $F_{\text{Обж}}$ препятствует возникновению пластического течения разогретого металла из области контакта деталь–деталь в направлении периферии сварной точки, снижает вероятность образования выплеска и уменьшает необходимое для качественной сварки усилие сжатия токоподводящих электродов. Требуемое сварочное усилие $F_{\text{СВ}}$ можно уменьшить при применении дополнительного импульса тока подогрева $I_{\text{П}}$ (см. рисунок 3.27, б, в). Предварительный подогрев металла в совокупности с обжатием периферийной зоны соединения позволяет практически исключить вероятность появления выплесков и снизить усилие сжатия электродов за счет повышения пластичности свариваемых металлов.

Применение дополнительного импульса тока подогрева $I_{\text{П}}$ также определяет вероятный путь протекания сварочного тока, так как при его пропускании практически исчезает сопротивление контакта деталь–деталь в области формирования будущего литого ядра. В связи с этим при приложении усилия обжатия $F_{\text{Обж}}$ и резком увеличении площади контакта деталь–деталь плотность сварочного тока будет изменяться незначительно.

Отношение амплитуды тока подогрева $I_{\text{П}}$ к амплитуде сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ принимается равным 1 : 5, время протекания импульса тока подогрева $\tau_{\text{П}}$ выбирается минимальным и составляет 0,02...0,04 с. При этом усилие $F_{\text{СВ}}$ определяется из соотношения [178]

$$F_{\text{СВ}} = \alpha \cdot F'_{\text{СВ}}, \quad (3.7)$$

где $F'_{\text{СВ}}$ – усилие сжатия, прикладываемое к электродам сварочной машины при сварке без подогрева;

α – коэффициент, учитывающий снижение усилия $F'_{\text{СВ}}$ в связи с применением дополнительного тока подогрева, $\alpha = 0,85...0,9$.

Время задержки τ_3 включения сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ после приложения $F_{\text{Обж}}$ для различных толщин металлов составляет 0,06...0,08 с.

Длительность выдержки ковочного усилия $\tau_{\text{Ков}}$ также оказывает влияние на прочность сварных соединений [29, 175]. Исходя из эффективности применяемого механического воздействия ковочного усилия на циклическую прочность соединений, рекомендуется не снимать ковочного усилия до момента достижения в зоне пластического пояска сварной точки средней температуры 200...300 °С [153, 179].

Параметры рекомендуемых режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей с обжатием периферийной зоны соединения по циклограммам (см. рисунок 3.27) приведены в таблицах 3.2 и 3.3 соответственно [153].

Сварка деталей из стали Ст3 толщиной 1,5 + 2,5 мм была произведена при следующих параметрах режима (см. рисунок 3.27, а): $I_{\text{СВ}} = 13$ кА; $\tau_{\text{СВ}} = 0,24$ с;



$\tau_{\text{ОБЖ}} = \tau_{\text{КОВ}} = 0,8$ с; $\tau_3 = 0,14$ с; $d_{\text{Э}} = 6,5$ мм; $d_{\text{ПВ}} = 17$ мм; $F_{\text{ОБЖ}} = 3500$ Н; $F_{\text{СВ}} = 3200$ Н; $F_{\text{КОВ}} = F_{\text{ОБЖ}} = 3500$ Н. Глубина вмятины на лицевой поверхности при этом составила 0,02...0,03 мм; среднее значение диаметра литого ядра и пластического пояса вокруг сварной точки – 6,0 и 7,6 мм соответственно.

Таблица 3.2 – Параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей с обжатием и проковкой периферийной зоны соединения кольцевым пуансоном

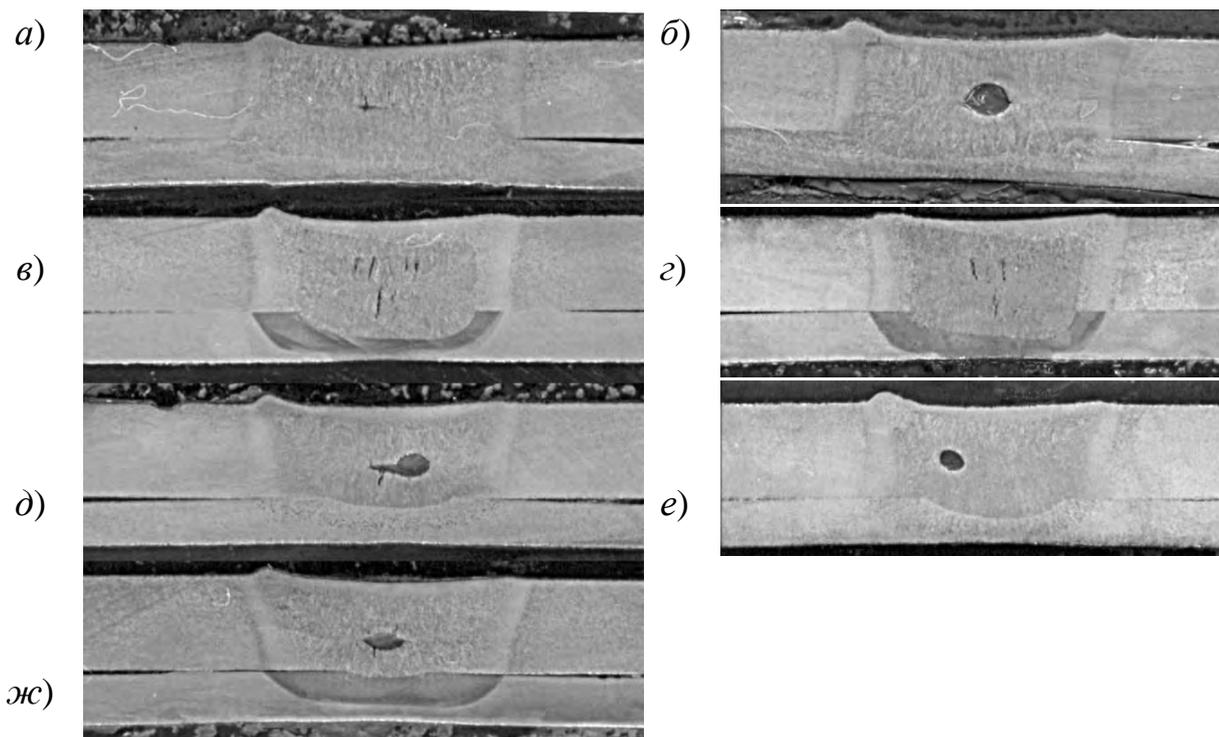
δ , мм	$I_{\text{СВ}}$, кА	$\tau_{\text{СВ}}$, с	$F_{\text{СВ}}$, Н	$\tau_{\text{СЖ}}$, с	$F_{\text{ОБЖ}}$, Н	$F_{\text{КОВ}}$, Н	$\tau_{\text{КОВ}}$, с	τ_3 , с	$d_{\text{Э}}$, мм	$d_{\text{Я}}$, мм
0,8	10,8	0,10	1700	0,1	2000	2000	0,37	0,06	4,5	4,5
1	13,0	0,12	2200	0,1	2500	2500	0,43	0,06	5,0	5,0
1,2	13,7	0,16	2600	0,16	3000	3000	0,48	0,06	5,5	5,5
1,5	15,0	0,20	3000	0,2	3700	3700	0,64	0,08	6,0	6,0
2	16,8	0,28	4100	0,3	5400	5400	0,80	0,08	7,0	7,0
3	19,8	0,36	5400	0,36	7900	7900	1,25	0,08	9,0	9,0
4	21,6	0,54	9000	0,5	11500	11500	1,90	0,08	11,0	11,0

Таблица 3.3 – Параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей с обжатием периферийной зоны соединения и предварительным импульсом тока подогрева

δ , мм	$I_{\text{СВ}}$, кА	$\tau_{\text{СВ}}$, с	$I_{\text{П}}$, кА	$\tau_{\text{П}}$, с	$F_{\text{СВ}}$, Н	$\tau_{\text{СЖ}}$, с	$F_{\text{ОБЖ}}$, Н	τ_3 , с	$F_{\text{КОВ}}$, Н	$\tau_{\text{КОВ}}$, с
0,8	9,0	0,10	1,8	0,02	1500	0,1	2000	0,06	2000	0,37
1	10,8	0,12	2,1	0,02	2000	0,1	2500	0,06	2500	0,43
1,2	11,4	0,16	2,3	0,02	2400	0,16	3000	0,06	3000	0,48
1,5	12,5	0,20	2,5	0,02	2700	0,2	3700	0,08	3700	0,64
2	14,0	0,28	2,8	0,02	3700	0,3	5400	0,08	5400	0,80
3	16,5	0,36	3,3	0,04	4800	0,36	7900	0,08	7900	1,25
4	18,0	0,54	3,6	0,04	8100	0,5	11500	0,08	11500	1,90

Также производили сварку деталей толщиной 1,5 + 2,5 мм с дополнительным импульсом тока подогрева при следующих параметрах режима (см. рисунок 3.27, б): $I_{\text{П}} = 6,5$ кА; $\tau_{\text{П}} = 0,04$ с; $\tau_3 = 0,14$ с; $I_{\text{СВ}} = 11$ кА; $\tau_{\text{СВ}} = 0,24$ с; $\tau_{\text{ОБЖ}} = \tau_{\text{КОВ}} = 0,8$ с; $d_{\text{Э}} = 6,5$ мм; $d_{\text{ПВ}} = 17$ мм; $F_{\text{ОБЖ}} = 3500$ Н; $F_{\text{СВ}} = 3000$ Н; $F_{\text{КОВ}} = F_{\text{ОБЖ}} = 3500$ Н. Глубина вмятины на лицевой поверхности составила 0,01...0,02 мм; среднее значение диаметра литого ядра $d_{\text{Я}} = 6,9$ мм и пластического пояса вокруг сварной точки $d_{\text{П}} = 8,3$ мм. На рисунке 3.28 представлены макрошлифы сварных соединений.





а, б – $F_{\text{обж}} = 2600 \text{ Н}$; *в, г* – $F_{\text{обж}} = 3900 \text{ Н}$; *д, е* – $F_{\text{обж}} = 5300 \text{ Н}$; *ж* – $F_{\text{обж}} = 6000 \text{ Н}$

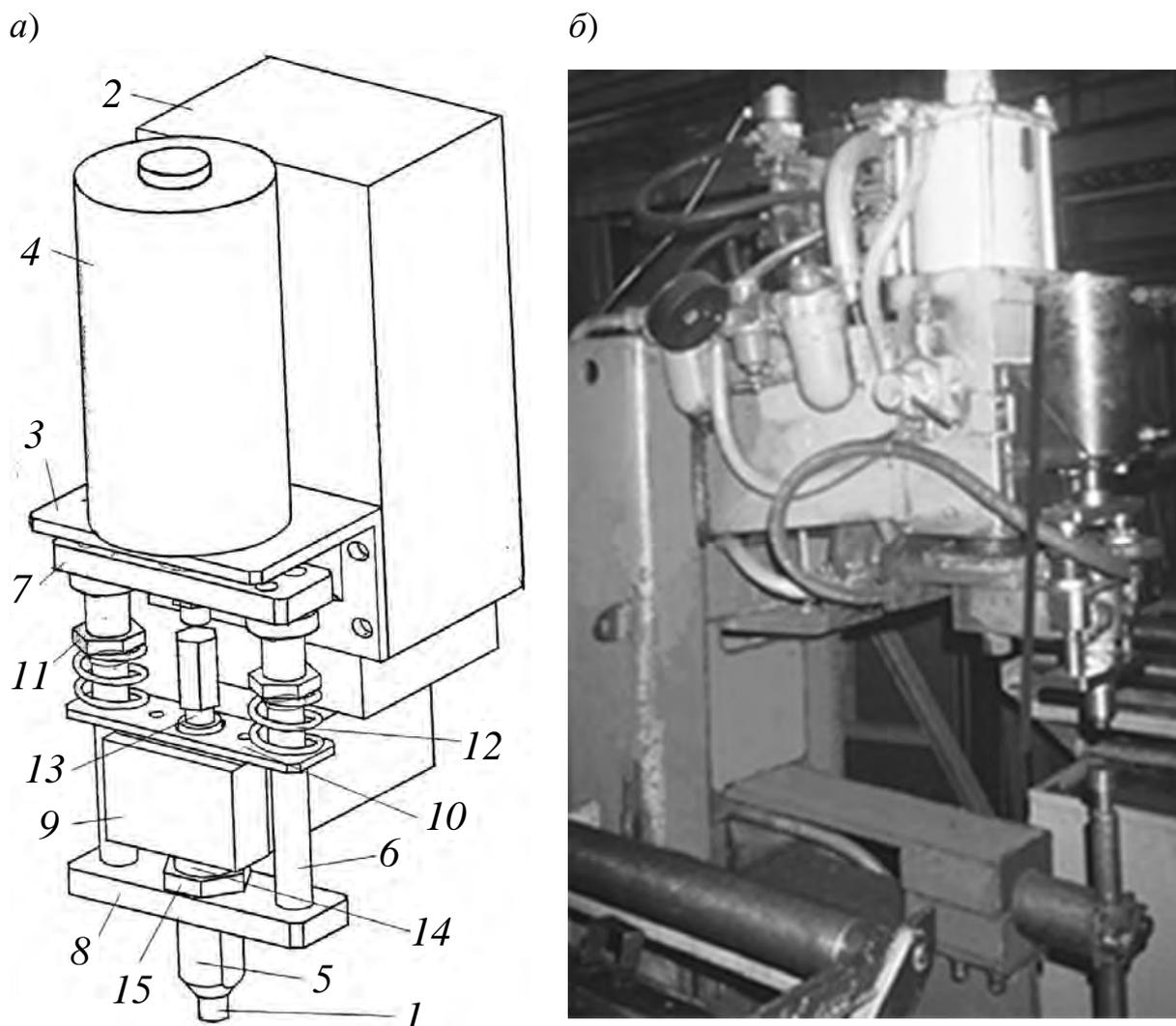
Рисунок 3.28 – Макрошлифы сварных соединений из стали Ст3 толщиной 1,5 + 2,5 мм при изменении усилия обжатия периферийной зоны при постоянном сварочном усилии $F_{\text{св}} = 3900 \text{ Н}$

Результаты исследований показали, что при использовании обжатия периферийной зоны можно заметно уменьшить зазор между свариваемыми деталями. При этом наиболее оптимальными значениями усилия обжатия являются $F_{\text{обж}} = 2600...3900 \text{ Н}$ (см. рисунок 3.28, *а–г*). Вместе с тем глубина проплавления деталей составляет 70...80 % от их суммарной толщины. Глубина проплавления тонкой детали при этом достигает 50...60 %. При усилии обжатия $F_{\text{обж}} = 5300...6000 \text{ Н}$ (см. рисунок 3.28, *д–ж*) глубина проплавления заметно уменьшается, что объясняется значительным увеличением площади контакта деталь–деталь и снижением плотности тока.

Разработанный технологический процесс контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволил снизить деформации на лицевых поверхностях изделий на 40...50 % по сравнению со сваркой без обжатия, исключить появление внутренних выплесков расплавленного металла и соблюсти требуемые размеры литого ядра и пластического пояса сварной точки.

Для обеспечения независимого приложения усилий к сварочному электроду и кольцевому пуансону (см. рисунок 3.27) разработана и запатенто-

вана машина для точечной сварки с автономным обжатием периферийной зоны (патент РБ № 9558 С1), представленная на рисунке 3.29 [163, 180].



а – схема пневмопривода обжатия; *б* – модернизированная машина для контактной точечной сварки МТ-1818

Рисунок 3.29 – Установка для точечной сварки с автономным обжатием периферийной зоны соединения

Машина для контактной точечной сварки содержит токопроводящий электрод *1*, корпус *2* и жестко соединенный с ним при помощи уголка *3* дополнительный пневмоцилиндр *4* (см. рисунок 3.29, *а*). Поршень пневмоцилиндра *4* соединен с обжимающим кольцевым пуансоном *5* посредством цилиндрических стоек *6*. Стойки *6* жестко соединены с верхней *7* и нижней *8* опорами. На консоли *9* машины для контактной точечной сварки закреплена изолированная от нее пластина *10* с отверстиями для цилиндрических стоек *6*, на поверхностях которых, расположенных между верхней опорой *7* и пластиной *10*, выполнена

резьба и установлены гайки 11. Между гайками 11 и пластиной 10 размещены пружины 12 для обеспечения дополнительного хода пуансона 4.

При подъеме электрода на дополнительный ход пружины 12, упирающиеся одним торцом в пластину 10, а другим в гайки 11, подтягивают нижнюю опору 8 с закрепленным на ней пуансоном 5 вверх. Между консолью 9 и нижней опорой 8 на электрододержателе 13 расположена изоляционная втулка 14, в которую упирается нижняя опора 8. Пуансон 5 крепится к нижней опоре 8 с помощью гайки 15. При опускании электрода 1 из верхнего положения в рабочее консоль 9, двигаясь вниз, тянет за собой конструкцию, состоящую из верхней 7 и нижней 8 опор и жестко соединенных с ней двух цилиндрических стоек 6, а также кольцевой пуансон 5. При этом обе камеры пневмоцилиндра 4 соединены с атмосферой.

Установка собрана на базе машины для контактной точечной сварки МТ-1818 (см. рисунок 3.29, б). При нажатии на педаль машины электрод 1 вместе с конструкцией, состоящей из верхней 7 и нижней 8 опор и жестко соединенных с ней двух цилиндрических стоек 6, опускается на рабочий ход. При подаче давления в верхнюю камеру пневмоцилиндра 4 к периферийной зоне с помощью пуансона 5 прикладывается усилие обжатия. При этом пружины 12 деформируются на величину выступа электрода (около 15 мм). Рабочее усилие пружины составляет 500 Н. Предварительное усилие деформирования пружины – около 200 Н. Регулировка сжатия пружин осуществляется гайками 11. После окончания сварки верхняя пневмокамера пневмоцилиндра 4 соединяется с атмосферой, и конструкция, состоящая из верхней 7 и нижней 8 опор и жестко соединенных с ней двух цилиндрических стоек 6, под воздействием пружин 12 возвращается в исходное положение.

Благодаря тому, что дополнительный пневмоцилиндр и соединенный с ним кольцевой пуансон вынесены за пределы корпуса машины, отпадает необходимость изменения ее внутренней компоновки и переделки пневмопривода. Устройство обеспечивает дополнительный ход пуансона и свободный доступ к электроду при его зачистке и замене. Для исключения появления вихревых токов и повышенного разогрева все детали рамки изготавливаются из нержавеющей стали. Для повышения теплоотвода от периферийной зоны кольцевой пуансон изготавливался из бронзы.

Результаты производственных испытаний показали, что предложенный способ контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения и электродное устройство для его реализации при выборе оптимальных режимов сварки позволяют практически исключить деформации со стороны электрода с увеличенной площадью контакта и дополнительные операции зачистки и шлифовки лицевых поверхностей изделий.



Выводы

Определены основные факторы, оказывающие влияние на снижение глубины вмятин от электродов при точечной сварке.

Увеличение жесткости режима, являясь одним из путей уменьшения вмятин, связано с ростом вероятности возникновения выплесков. Поэтому необходимо создание условий деформирования соединения, позволяющих снизить время протекания максимального тока, обеспечив при этом удержание расплавленного металла в межэлектродной зоне.

Применение электрода с увеличенной рабочей поверхностью не исключает появления вмятин со стороны лицевой поверхности изделия в связи с износом данного электрода, перераспределением плотности электрического тока в зоне контакта электрод–деталь и повышением контактного сопротивления, что приводит к изменению условий теплоотвода. Поэтому в процессе сварки необходимо постоянно следить за состоянием электрода. При его износе и появлении на нем углубления нужно увеличивать усилие сжатия электродов.

Применение вставок из сплавов с повышенными прочностными характеристиками позволяет не только уменьшить глубину вмятины, но и увеличить работоспособность электродов за счет снижения износа.

Снизить деформации лицевых поверхностей изделий и износ электродов можно также за счет улучшения условий охлаждения электродов.

Способ контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволяет не только значительно уменьшить деформации лицевых поверхностей изделий, но и повысить прочность соединений. Снятие усилия проковки с токоподводящего электрода и приложение его к кольцевому пуансону приводит к улучшению прочностных показателей соединения, связанному с уменьшением величины остаточных радиальных, осевых и тангенциальных напряжений в зоне пластического пояска сварной точки. Применение обжатия позволяет повысить статическую прочность точечных соединений на 10...25 %.

Разработанный технологический процесс контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволил снизить деформации на лицевых поверхностях изделий на 40...50 % по сравнению со сваркой без обжатия, исключить появление внутренних выплесков расплавленного металла и соблюсти требуемые размеры литого ядра и пластического пояска сварной точки. Углубление на поверхности детали со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью после проковки при этом составляет лишь 0,5...2 % от толщины детали.

Разработанная математическая модель термодформационного цикла сварки с обжатием периферийной зоны соединения позволяет с достаточно высокой достоверностью проследить кинетику образования вмятин и распределение остаточных напряжений в околошовной зоне.

Влияние процесса обжатия периферийной зоны соединения на прочность сварного соединения заключается в том, что приложение усилия проковки $F_{\text{КОВ}}$ к кольцевому пуансону существенно меняет картину распределения остаточных напряжений в зоне соединения. При сварке в металле межэлектродного пространства создается напряженно-деформированное состояние, препятствующее деформации в радиальном и осевом направлениях и увеличивающее сопротивление пластическому течению металла из зоны сварного соединения к периферии сварной точки. Таким образом, применение обжатия периферийной зоны повышает эффективность операции проковки.

Рассчитаны параметры силового воздействия на детали при точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения.

На основании анализа схемы равновесия замкнутой силовой системы электрод–пуансон–детали–электрод установлено, что усилие обжатия $F_{\text{ОБЖ}}$ снижает вероятность образования выплеска и уменьшает на 15...20 % необходимое для качественной сварки усилие сжатия электродов. Обжатие периферийной зоны соединения способствует применению более жестких режимов сварки, чем при сварке без обжатия, за счет передачи части усилия обжатия в область пластического пояса.

Определены параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей с обжатием периферийной зоны соединения и предварительным импульсом тока подогрева, с обжатием и проковкой периферийной зоны соединения кольцевым пуансоном.

Разработана и запатентована машина для точечной сварки с автономным обжатием периферийной зоны (патент РБ № 9558), обеспечивающая независимое приложение усилий сжатия к сварочному электроду и кольцевому пуансону.

Результаты производственных испытаний показали, что предложенный способ контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения и машина для его реализации при выборе оптимальных режимов сварки позволяют практически исключить деформации со стороны электрода с увеличенной площадью контакта и дополнительные операции зачистки и шлифовки лицевых поверхностей изделий.



4 Способы регулирования термдеформационного цикла рельефной сварки Т-образных сварных соединений

4.1 Влияние параметров термдеформационного цикла рельефной сварки «острой гранью» на прочностные показатели соединений

Совершенствование термдеформационного цикла рельефной сварки Т-образных сварных соединений является перспективным направлением развития современного машиностроения. Т-образная рельефная сварка – ресурсосберегающий технологический процесс, повышающий производительность труда и качество продукции. Однако, в отличие от хорошо изученных процессов контактной точечной сварки, до сих пор не существовало алгоритма, руководствуясь которым можно было бы определить оптимальные технологические параметры режима Т-образной сварки и обеспечить требуемое качество сварного соединения [27, 80, 181].

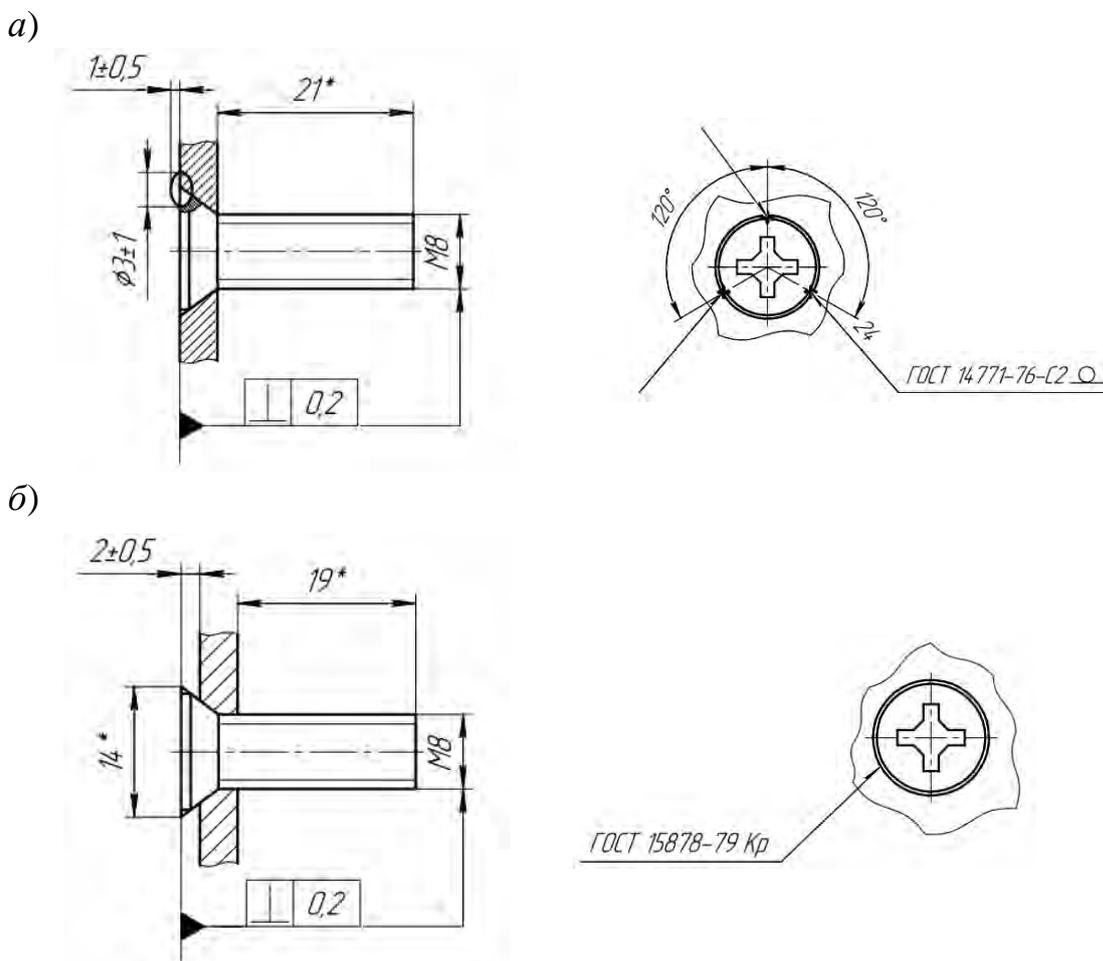
Типичным примером возможности применения Т-образной рельефной сварки является изготовление плиты переходной для установки сидений в троллейбусах на предприятии ОАО «Белкоммунмаш» (г. Минск). Переходная плита состоит из пластины толщиной 4 мм (горячекатаная сталь СтЗпс ГОСТ 380–2005), к которой привариваются восемь винтов М8 с потайной головкой (ГОСТ 17475–80). На предприятии плиту переходную изготавливают механизированной дуговой сваркой (рисунок 4.1, а). Замена дуговой сварки на Т-образную рельефную «острой гранью» (рисунок 4.1, б) дает значительное увеличение производительности и экономию сварочных материалов.

Характерной особенностью рельефной сварки Т-образных соединений является отсутствие зоны взаимного расплавления. Для получения надежных соединений при сварке в твердой фазе необходима совместная пластическая деформация металла свариваемых деталей, приводящая к разрушению оксидных пленок, активации контактных поверхностей, образованию между ними физического контакта и объемного взаимодействия [27, 181].

Однако значительной проблемой, возникающей при рельефной сварке горячекатаных сталей, массово поставляемых на предприятия для изготовления сварных конструкций, является наличие на поверхности неудаленной окалины, что повышает диапазон изменения сопротивлений контактов электрод–деталь $r_{эд}$ и деталь–деталь $r_{дд}$ до 60...1000 мкОм в зависимости от способа очистки. Окалина, обладая высокой плотностью и низкой теплопроводностью, препятствует образованию соединения в твердой фазе, так как в процессе нагрева может нагреваться до пластичного состояния, но не полностью вытесняться из зоны контактов. Так как температура плавления $T_{пл}$ окалины ниже, чем у основного металла, в процессе сварки при увеличении



тока значительно возрастает вероятность появления выплесков расплавленного металла. Повышенное сопротивление контактов электрод–деталь ведет к перегреву электродов, существенно снижается их стойкость и срок службы.



а – механизированной дуговой сваркой; б – рельефной сваркой «острой гранью»

Рисунок 4.1 – Соединение винта с пластиной из горячекатаной стали

При Т-образной рельефной сварке «острой гранью» винтов с пластиной из горячекатаной стали создаются благоприятные условия для расплавления и полного вытеснения окалины из зоны контакта деталь–деталь. При механической обработке (сверление отверстий в пластине) в результате разрушения окалины появляется возможность сварки без зачистки поверхности горячекатаной стали. Применение винтов с потайной головкой, скошенной под углом 45°, исключает дополнительные расходы, связанные с изготовлением рельефа.

При сборке винта с пластиной и приложении предварительного усилия сжатия электродов между деталями по кромке отверстия образуется начальный кольцевой контакт с высоким сопротивлением. В начале протекания импульса сварочного тока из-за большой плотности тока в этой зоне появляются начальные выплески расплавленного металла. Прочность сварных соединений

при колебаниях параметров режима нестабильная и значительно уменьшается при возникновении выплесков, вплоть до ее полной потери.

Существуют некоторые технологические рекомендации по контактной точечной и рельефной сварке горячекатаных сталей, позволяющие получить соединения приемлемого качества.

Для удаления окалины может использоваться дробеструйная, пескоструйная и другие способы очистки поверхности, а также очистка от окалины наждачным кругом узких участков деталей в месте образования соединения.

Однако сталь после данных видов обработки имеет грубую шероховатую поверхность, как наждачная бумага. Влияние же состояния поверхности на сопротивления $r_{\text{дд}}$ и $r_{\text{эд}}$ очень велико. Сопротивление контакта играет роль концентратора теплоты и может заметно влиять на распределение температур в свариваемых деталях. Ведь в зоне контакта, сопротивление которого быстро падает до нуля, появляется тонкий слой сильно нагретого металла с высоким удельным сопротивлением. При дальнейшем протекании тока наблюдается местное тепловыделение в зоне указанного слоя металла, нагретого до более высокой температуры.

Например, величина контактного сопротивления $r_{\text{дд}}$ между деталями, обработанными наждачным кругом, может достигать до 100 мкОм. После включения сварочного тока микроконтакты шероховатостей быстро нагреваются, происходит перегрев контактов и выплеск расплавленного металла. Это ведет к привариванию электродов к поверхности деталей и внедрению стали в контактную поверхность электродов, что требует их частой зачистки. Таким образом, грубо обработанные поверхности значительно ухудшают качество контактной рельефной сварки.

При сварке горячекатаного металла может применяться многоимпульсная сварка. На рисунке 4.2 приведена циклограмма процесса сварки горячекатаной стали [4].

В процессе многоимпульсной сварки после предварительного сжатия электродов усилием $F_{\text{св}}$ в течение времени $\tau_{\text{сж}}$ пропускаются несколько импульсов тока подогрева с длительностью протекания $\tau_{\text{и}}$ и паузами между импульсами $\tau_{\text{п}}$, которые способствуют расплавлению и вытеснению под действием усилия $F_{\text{св}}$ окалины из зоны контактов, тем самым стабилизируя начальные контактные сопротивления и площади контактов. В связи с этим в начале пропускания сварочного тока $I_{\text{св}}$ снижается его плотность и, как следствие, вероятность появления выплесков из зоны контактов деталь–деталь и электрод–деталь. Применение повышенного ковочного усилия $F_{\text{ков}}$ устраняет дефекты литого ядра и уменьшает остаточные напряжения в околошовной зоне соединения.



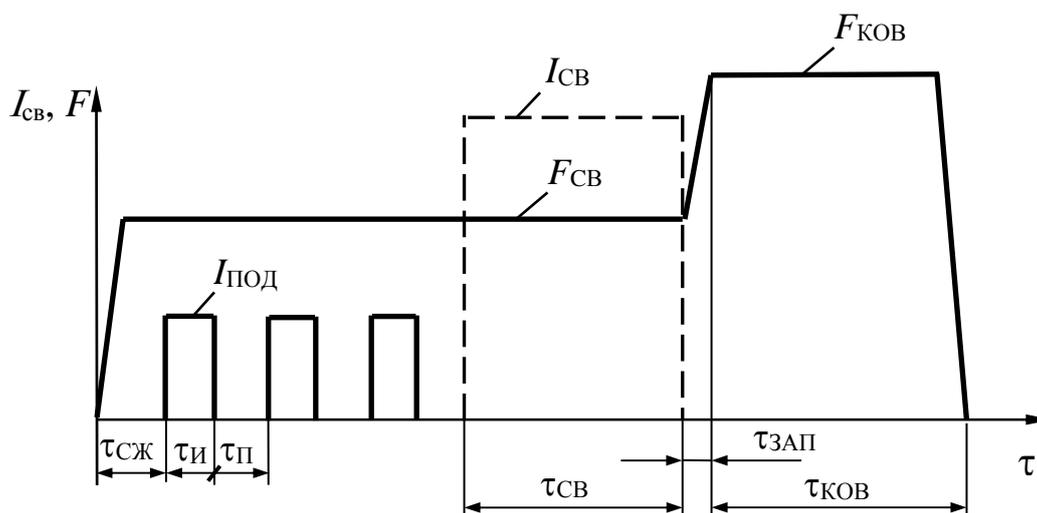


Рисунок 4.2 – Циклограмма процесса контактной сварки горячекатаной стали

Количество импульсов подогрева $I_{\text{ПОД}}$, их длительность $\tau_{\text{И}}$, количество и время пауз $\tau_{\text{П}}$ зависят от толщины металла. Повышенное усилие $F_{\text{СВ}}$ применяется для снижения контактных сопротивлений.

Таким образом, применение рельефной сварки «острой гранью» горячекатаной стали позволяет создать наиболее приемлемые условия для получения качественного соединения по следующим причинам.

Во-первых, при подготовке деталей и получении естественного рельефа за счет сверления отверстий в пластине и снятия фасок происходит частичное разрушение окалины.

Во-вторых, в процессе сварки из-за интенсивной пластической деформации рельефа создаются условия для разрушения и вытеснения окалины из зоны контакта деталь–деталь.

В-третьих, применение электродов с увеличенной контактной поверхностью снижает сопротивление контактов электрод–деталь, за счет чего повышается их стойкость.

Для исследования прочности соединений винтов с пластиной из горячекатаной стали при рельефной сварке «острой гранью» использовали две циклограммы сварки с импульсом подогрева: циклограмму № 1 с постоянным усилием сжатия электродов при подогреве, сварке и проковке $F_{\text{ПОД}} = F_{\text{СВ}} = F_{\text{КОВ}}$ (рисунок 4.3) и циклограмму № 2 с пониженным усилием сжатия при подогреве $F_{\text{ПОД}}$ и повышенным усилием сжатия при сварке и проковке $F_{\text{СВ}} = F_{\text{КОВ}}$ (рисунок 4.4).

После сварки по данным циклограммам с вариацией параметров режима сваренные образцы были испытаны на отрыв статическим продавливанием на разрывной машине РГМ-1000 (рисунок 4.5, а) по следующей схеме нагружения (рисунок 4.5, б). В итоге подтверждено, что при рельефной сварке «острой гранью» горячекатаной стали с винтами отклонения параметров режима

оказывают существенное влияние на прочность сварных соединений. Результаты испытаний на прочность образцов, сваренных по циклограмме № 1, представлены на рисунке 4.6.

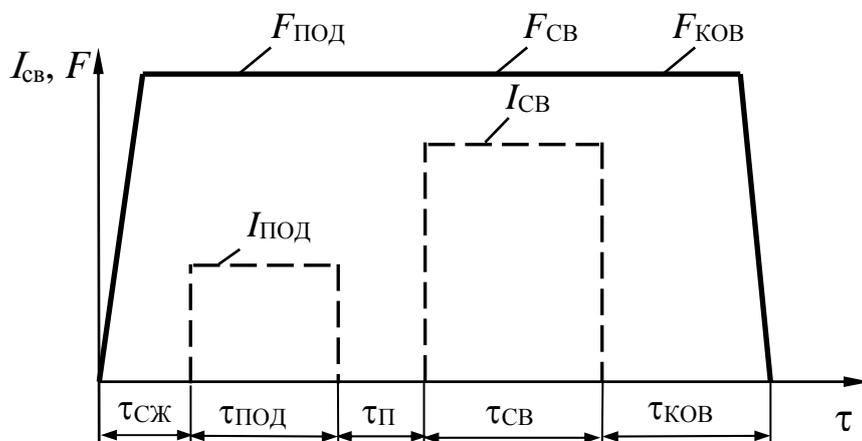


Рисунок 4.3 – Циклограмма № 1 рельефной сварки с импульсом подогрева и постоянным усилием сжатия электродов при подогреве, сварке и проковке $F_{ПОД} = F_{СВ} = F_{КОВ}$

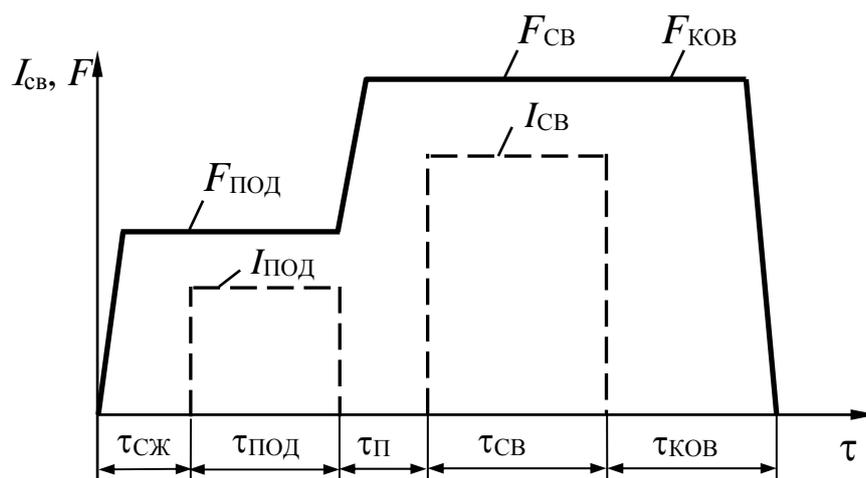


Рисунок 4.4 – Циклограмма № 2 рельефной сварки с импульсом подогрева и повышенным усилием сжатия при сварке и проковке $F_{СВ} = F_{КОВ}$

При оптимальном соотношении параметров режима ($I_{ПОД} = 9,6$ кА; $I_{СВ} = 16,8$ кА; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 6,3$ кН) среднее значение усилия на отрыв соединений $F_{ОТР}$ составило 18,25 кН при диапазоне его изменения от 11,56 до 25,59 кН (см. рисунок 4.6, кривая 1). Причем резкое снижение прочности наблюдалось на образцах, при сварке которых происходили сильные выплески расплавленного металла ($F_{ОТР} = 14,34; 11,56; 12,01$ кН).

При снижении параметров режима сварки до величин $I_{ПОД} = 7,7$ кА; $I_{СВ} = 14,8$ кА; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 5,4$ кН значительно уменьшается среднее значение усилия на отрыв $F_{ОТР}$ до 12,3 кН при диапазоне его изменения от 6,78

до 17,08 кН (см. рисунок 4.6, кривая 2). Причем на образцах, при сварке которых наблюдались сильные выплески, происходит еще более резкое снижение прочности ($F_{\text{отр}} = 9,39; 6,78; 7,71$ кН).

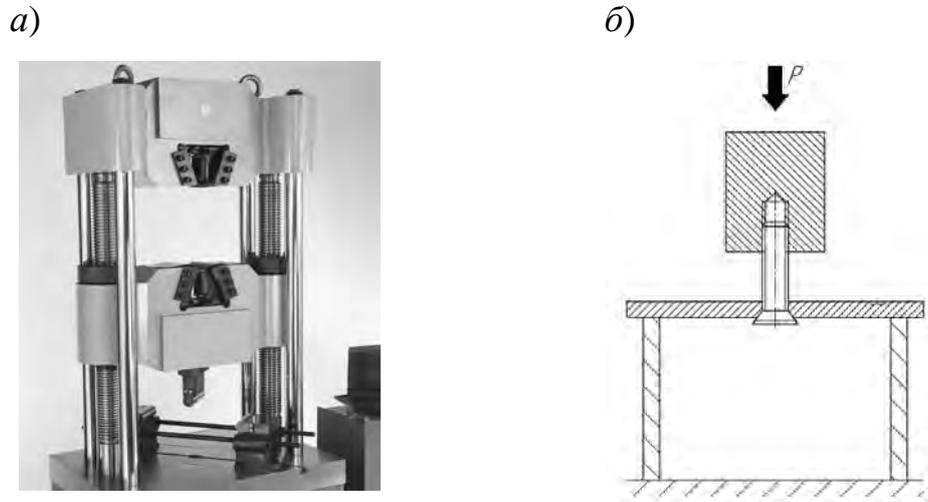
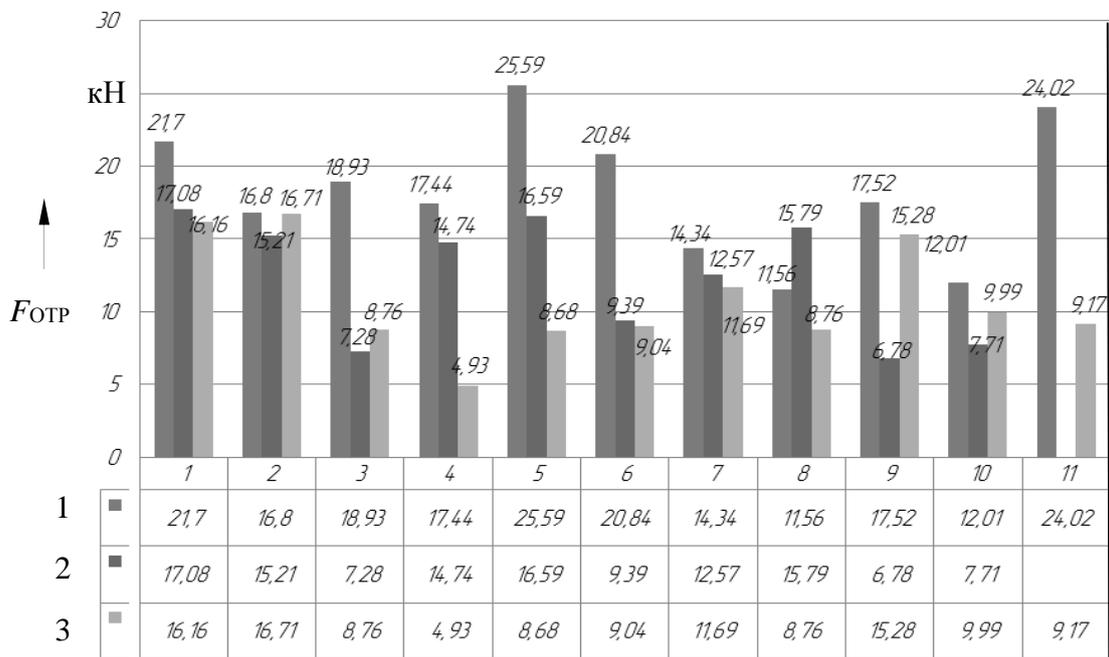


Рисунок 4.5 – Разрывная машина РГМ-1000 (а) и схема испытания на отрыв статическим продавливанием (б)



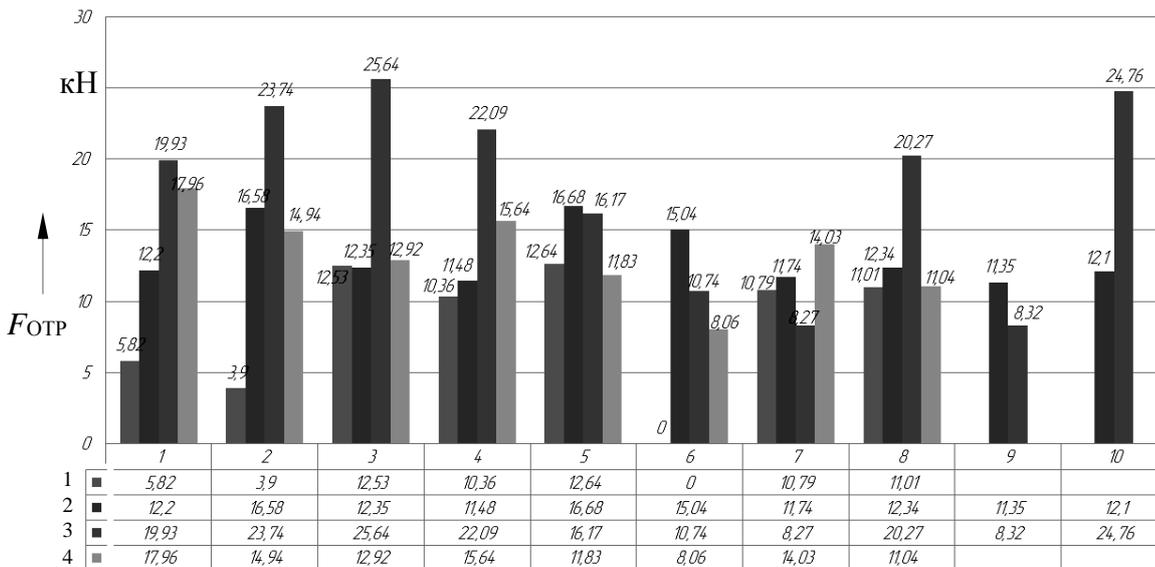
1 – $I_{\text{под}} = 9,6$ кА; $I_{\text{св}} = 16,8$ кА; $F_{\text{св}} = F_{\text{ков}} = 6,3$ кН; 2 – $I_{\text{под}} = 7,7$ кА; $I_{\text{св}} = 14,8$ кА; $F_{\text{св}} = F_{\text{ков}} = 5,4$ кН; 3 – $I_{\text{под}} = 7,7$ кА; $I_{\text{св}} = 16,1$ кА; $F_{\text{св}} = F_{\text{ков}} = 6,4$ кН

Рисунок 4.6 – Результаты испытаний на прочность образцов, сваренных по циклограмме № 1 с постоянным усилием сжатия при $\tau_{\text{под}} = \tau_{\text{св}} = 0,3$ с

Повышение сварочного тока и усилия сжатия до величин $I_{СВ} = 16,1$ кА; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 6,4$ кН при токе подогрева $I_{ПОД} = 7,7$ кА не дает никакого повышения прочности. Среднее значение усилия на отрыв соединений $F_{ОТР}$ составило 10,8 кН при диапазоне его изменения от 4,93 до 16,71 кН (см. рисунок 4.6, кривая 3). Причем количество образцов, при сварке которых наблюдались сильные выплески, увеличилось ($F_{ОТР} = 8,76; 4,93; 9,04; 11,69; 9,99$ кН).

Таким образом, снижение тока подогрева отрицательно сказывается на прочности соединений, уменьшает температуру нагрева окалины и затрудняет ее вытеснение из зоны контактов, увеличение же сварочного тока при этом ведет лишь к росту вероятности выплесков, несмотря на повышенное усилие сжатия электродов.

С целью повышения прочности соединений при рельефной сварке «острой гранью» были сварены образцы по циклограмме № 2 с малым усилием сжатия электродов при подогреве $F_{ПОД}$ и повышенным усилием сжатия при сварке и проковке $F_{СВ} = F_{КОВ}$ (см. рисунок 4.4). Результаты испытаний на прочность образцов представлены на рисунках 4.7 и 4.8.

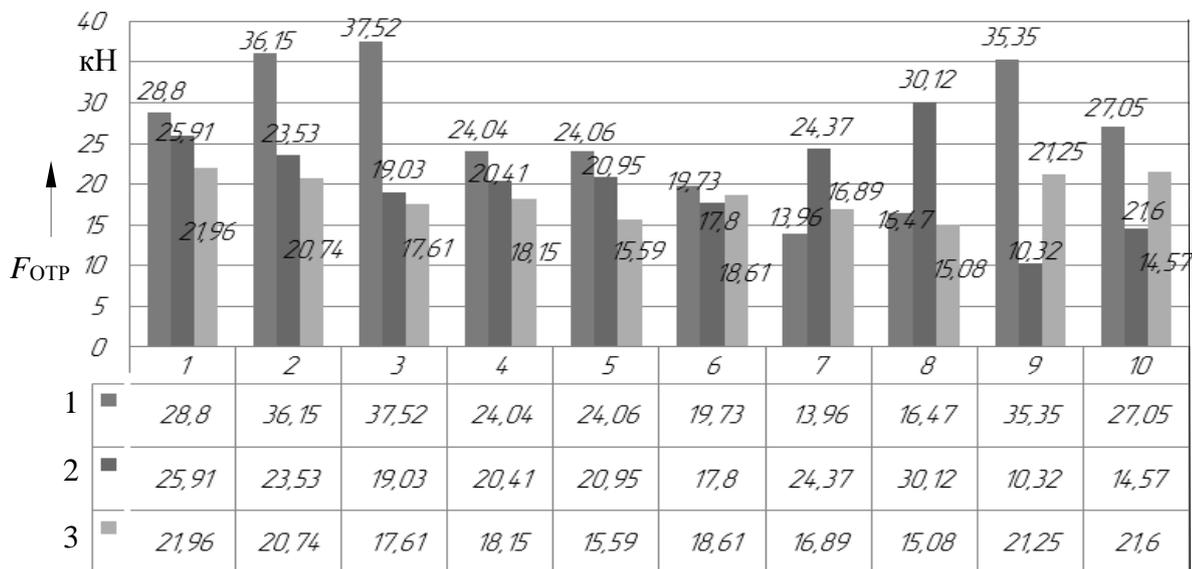


1 – $I_{ПОД} = 9,5$ кА; $I_{СВ} = 17$ кА; $F_{ПОД} = 4$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 14,5$ кН; 2 – $I_{ПОД} = 9,5$ кА; $I_{СВ} = 19$ кА; $F_{ПОД} = 4$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 14,5$ кН; 3 – $I_{ПОД} = 9,3$ кА; $I_{СВ} = 18,7$ кА; $F_{ПОД} = 3,8$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 12$ кН; 4 – $I_{ПОД} = 7,7$ кА; $I_{СВ} = 16,5$ кА; $F_{ПОД} = 3$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 10$ кН

Рисунок 4.7 – Результаты испытаний на прочность образцов, сваренных по циклограмме № 2 с повышенным усилием сжатия при $\tau_{ПОД} = \tau_{СВ} = 0,3$ с

При сварке по циклограмме № 2 на режимах $I_{ПОД} = 9,5$ кА; $I_{СВ} = 17$ кА; $F_{ПОД} = 4$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 14,5$ кН прочность соединений крайне нестабильная, при этом на некоторых образцах наблюдается полная потеря прочности

(см. рисунок 4.7, кривая 1). Негативно сказывается на прочности соединений недостаточная величина сварочного тока $I_{СВ} = 17$ кА и повышенные усилия при подогреве $F_{ПОД}$ и сварке $F_{СВ}$. Среднее значение усилия на отрыв соединений $F_{ОТР}$ составило 9,6 кН при разбросе от 3,9 до 12,64 кН.



1 – $I_{ПОД} = 9,6$ кА; $I_{СВ} = 18,9$ кА; $F_{ПОД} = 3$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 10$ кН; $\tau_{ПОД} = 0,3$ с; $\tau_{СВ} = 0,2$ с;
 2 – $I_{ПОД} = 7,7$ кА; $I_{СВ} = 16,5$ кА; $F_{ПОД} = 2$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 5$ кН; $\tau_{ПОД} = \tau_{СВ} = 0,3$ с;
 3 – $I_{ПОД} = 9,6$ кА; $I_{СВ} = 18,9$ кА; $F_{ПОД} = 3$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 10$ кН; $\tau_{ПОД} = \tau_{СВ} = 0,3$ с

Рисунок 4.8 – Результаты испытаний на прочность образцов, сваренных по циклограмме № 2 с повышенным усилием сжатия

При повышении сварочного тока до значения $I_{СВ} = 19$ кА среднее значение усилия на отрыв $F_{ОТР}$ увеличилось до 13,2 кН при разбросе от 11,35 до 16,68 кН (см. рисунок 4.7, кривая 2).

Понижение усилий сжатия до величин $F_{ПОД} = 3,8$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 12$ кН повышает среднее усилие $F_{ОТР}$ до 18 кН (см. рисунок 4.7, кривая 3) при его разбросе от 8,27 до 25,64 кН. Причем наблюдается резкое снижение прочности в образцах, при сварке которых имели место сильные выплески (10,74; 8,27; 8,32 кН).

При уменьшении токов подогрева и сварки до величин $I_{ПОД} = 7,7$ кА; $I_{СВ} = 16,5$ кА и снижении усилий $F_{ПОД} = 3$ кН; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 10$ кН среднее усилие на отрыв $F_{ОТР}$ снизилось до 13,3 кН (см. рисунок 4.7, кривая 4) при разбросе его значений от 8,06 до 17,96 кН.

Исходя из анализа экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что величина тока $I_{ПОД}$ и усилия $F_{ПОД}$ на этапе подогрева оказывают решающее влияние на степень разогрева окалины и ее вытеснение из зоны контакта свариваемых деталей.



Дальнейшие эксперименты показали, что значительного эффекта повышения прочности можно достичь при следующих параметрах режима: $I_{\text{Под}} = 9,6$ кА; $I_{\text{СВ}} = 18,9$ кА; $F_{\text{Под}} = 3$ кН; $F_{\text{СВ}} = F_{\text{КОВ}} = 10$ кН; $\tau_{\text{Под}} = \tau_{\text{СВ}} = 0,3$ с (см. рисунок 4.8, кривая 1), при этом среднее значение усилия на отрыв $F_{\text{Отр}}$ при отсутствии выплесков составило 22,8 кН при разбросе от 17,8 до 30,12 кН. На образцах с сильными выплесками $F_{\text{Отр}}$ составило 10,32 и 14,57 кН.

При снижении времени протекания тока до $\tau_{\text{СВ}} = 0,2$ с среднее значение усилия на отрыв $F_{\text{Отр}}$ составило 18,7 кН при разбросе от 15,08 до 21,96 кН (см. рисунок 4.8, кривая 2).

Дальнейшее снижение усилий до значений $F_{\text{Под}} = 2$ кН; $F_{\text{СВ}} = 5$ кН приводит к значительному увеличению степени разогрева соединения и нестабильности процесса сварки. Даже при уменьшении токов до величин $I_{\text{Под}} = 7,7$ кА; $I_{\text{СВ}} = 16,5$ кА наблюдались очень сильные выплески, однако при этом среднее значение усилия на отрыв $F_{\text{Отр}}$ составило 26,3 кН при разбросе от 13,96 до 37,52 кН (см. рисунок 4.8, кривая 3). Высокая прочность отдельных образцов (35...37 кН) свидетельствует об образовании между деталями общей расплавленной зоны, однако из-за сильных выплесков эта зона является нестабильной.

Таким образом, при рельефной сварке горячекатаной стали с винтами из-за значительного влияния отклонений параметров режима на прочность сварных соединений требуется стабилизация мощности тепловложения в межэлектродную зону. Поэтому разработка корректирующей системы автоматического регулирования мощности при рельефной сварке является актуальной задачей и требует проведения теоретических исследований, на результатах которых будет базироваться разработка аппаратной части системы и программы управления процессом.

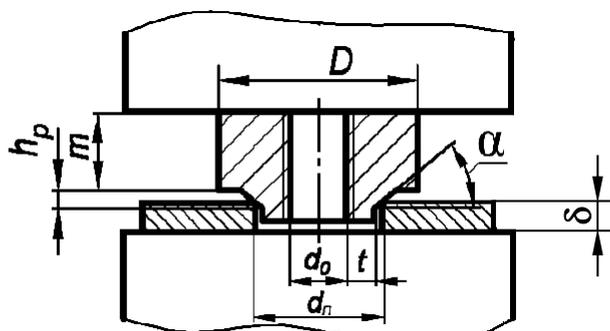
4.2 Методика определения параметров режима рельефной сварки «острой гранью» Т-образных сварных соединений

Для определения параметров режима рельефной сварки и изучения кинетики формирования сварных Т-образных соединений требуется разработка математической модели процесса. Основная проблема моделирования связана с необходимостью анализа совмещенной электротермодеформационной задачи с учетом быстропротекающих значительных пластических деформаций, которым подвергается зона сварного соединения в процессе осадки рельефа, и обеспечения сходимости вычислительного процесса [70, 71, 78, 80, 181].

В качестве примера исследовалась схема рельефной сварки «острой гранью» Т-образных соединений бобышки диаметром $D = 18$ мм с внутренним резьбовым отверстием с пластиной толщиной $\delta = 3$ мм (рисунок 4.9). Материал свариваемых деталей – низкоуглеродистая сталь. Основные параметры режима:



сварочный ток $I_{СВ} = 18$ кА; время протекания тока $\tau_{СВ} = 0,3$ с; время модуляции тока $\tau_{МОД} = 0,1$ с. Угол скоса грани α принимал следующие дискретные значения: 15, 30, 45, 60, 75°.



D – диаметр привариваемой бобышки; h_p – высота рельефа; m – высота бобышки; α – угол рельефа; d_0 – диаметр внутренней резьбы отверстия; $d_п$ – диаметр отверстия в пластине; t – толщина стенки; δ – толщина пластины

Рисунок 4.9 – Схема процесса рельефной сварки «острой гранью»

Для расчета основных параметров режима сварки необходимо теоретически обосновать следующие геометрические характеристики [154, 182]: угол рельефа α , высоту рельефа h_p , толщину стенки бобышки t .

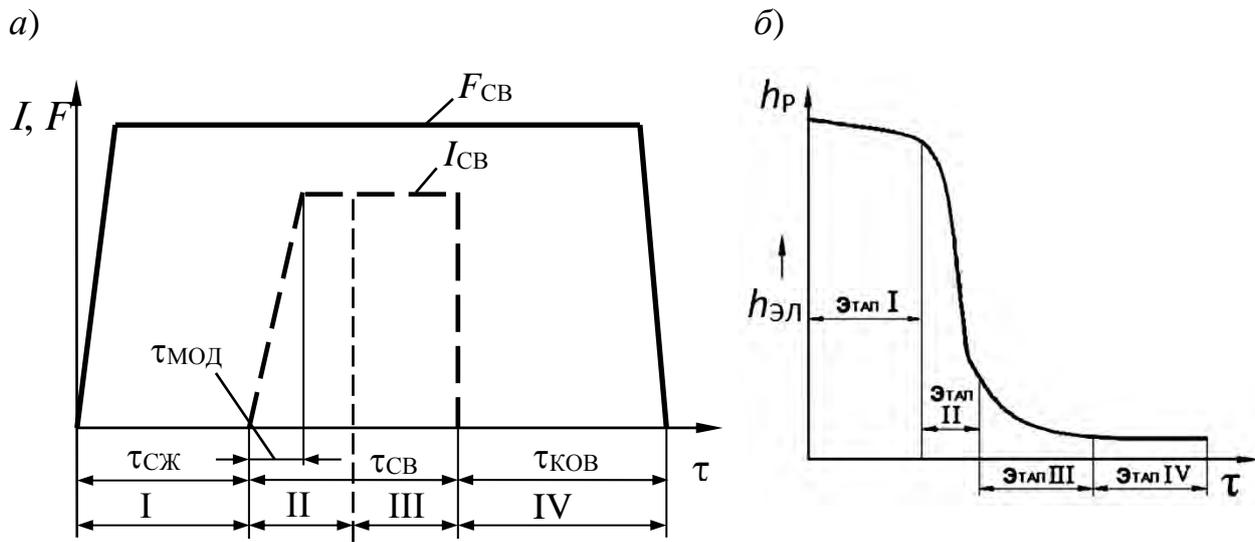
Результаты математического моделирования показали, что процесс образования сварного соединения при сварке «острой гранью» можно охарактеризовать следующими четырьмя этапами (рисунок 4.10) [80]:

- 1) совместной деформацией рельефа и листовой детали на этапе предварительного сжатия (этап I);
- 2) интенсивной высокоскоростной деформацией деталей в начальный период протекания сварочного тока (этап II);
- 3) снижением скорости деформации деталей к концу процесса нагрева (этап III);
- 4) окончательным формированием сварного соединения под действием усилия проковки (этап IV).

Этапы образования соединения представлены в качестве характерных зон на экспериментальной кривой, описывающей вертикальное перемещение подвижного электрода $h_{ЭЛ}$ в процессе сварки (см. рисунок 4.10, б).

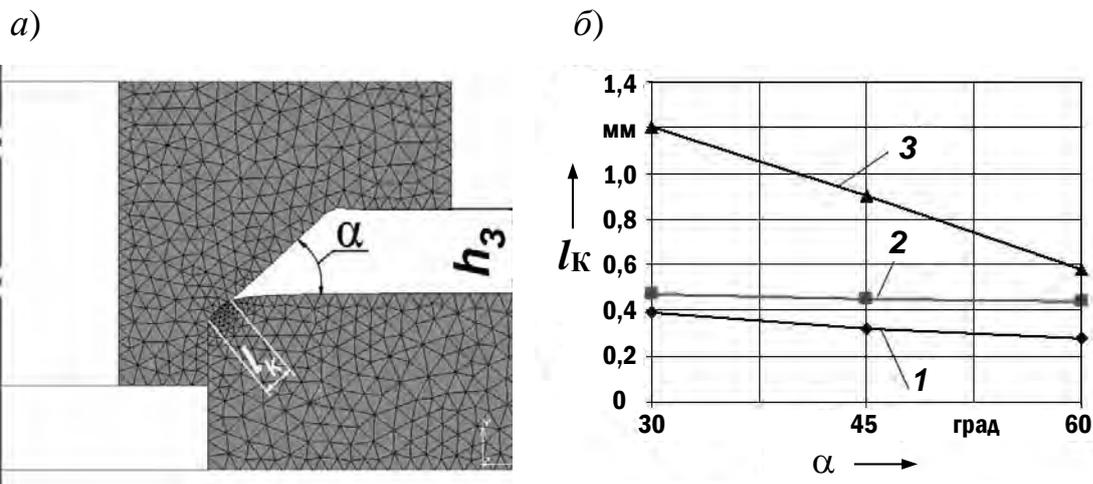
Первый этап начинается с предварительного сжатия деталей и создания между ними механического контакта. Для упрощения дальнейших расчетов, связанных с контактом острого угла пластины с бобышкой, размеры кольцевой контактной площадки l_k задавались как исходная геометрия модели (рисунок 4.11, а). Как показали вычислительные эксперименты, размер площадки l_k главным образом зависит от усилия сжатия электродов $F_{СВ}$ и в меньшей степе-

ни – от угла рельефа α (рисунок 4.11, б) и может составлять 0,3...1,2 мм. С уменьшением угла рельефа размер площадки l_k значительно увеличивается при повышении усилия сжатия.



а – циклограмма процесса рельефной сварки; б – типичная кривая перемещения подвижного электрода в процессе сварки

Рисунок 4.10 – Этапы образования сварного соединения



1 – $F_{CB} = 3$ кН; 2 – $F_{CB} = 5$ кН; 3 – $F_{CB} = 8$ кН

Рисунок 4.11 – Моделирование начального размера кольцевой контактной площадки l_k между деталями на этапе предварительного сжатия (а) в зависимости от угла рельефа α и усилия сжатия электродов (б)

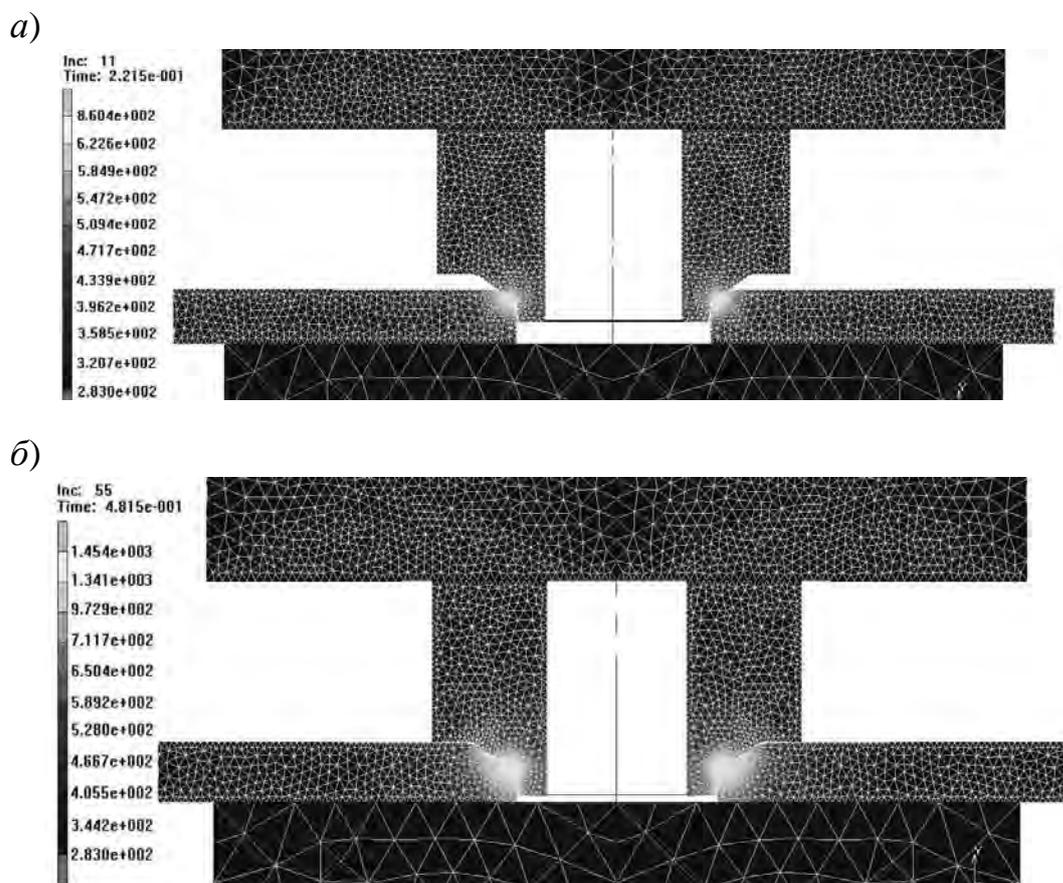
Предварительная деформация рельефа (этап I) способствует стабилизации электрического сопротивления контакта деталь–деталь и является необходимым условием получения качественных сварных соединений. Стабилизация

контактного сопротивления должна учитываться заданием начальной электропроводности и теплопроводности контакта (см. формулы (2.10) и (2.13)).

Наличие кольцевого контакта в момент включения сварочного тока (этап II) обеспечивает высокую начальную плотность тока, которая наряду с заданным электрическим сопротивлением контакта приводит к большой скорости нарастания температуры в зоне сварки (до 10^4 К/с).

Согласно гипотезе о трех стадиях образования сварных соединений при сварке давлением на данном этапе происходит образование физического контакта [4]. При этом контактные поверхности однородных соединяемых материалов сближаются на расстояние, при котором возникает слабое химическое взаимодействие и активация контактных поверхностей, которая в модели может учитываться только косвенным заданием соответствующих свойств контакта.

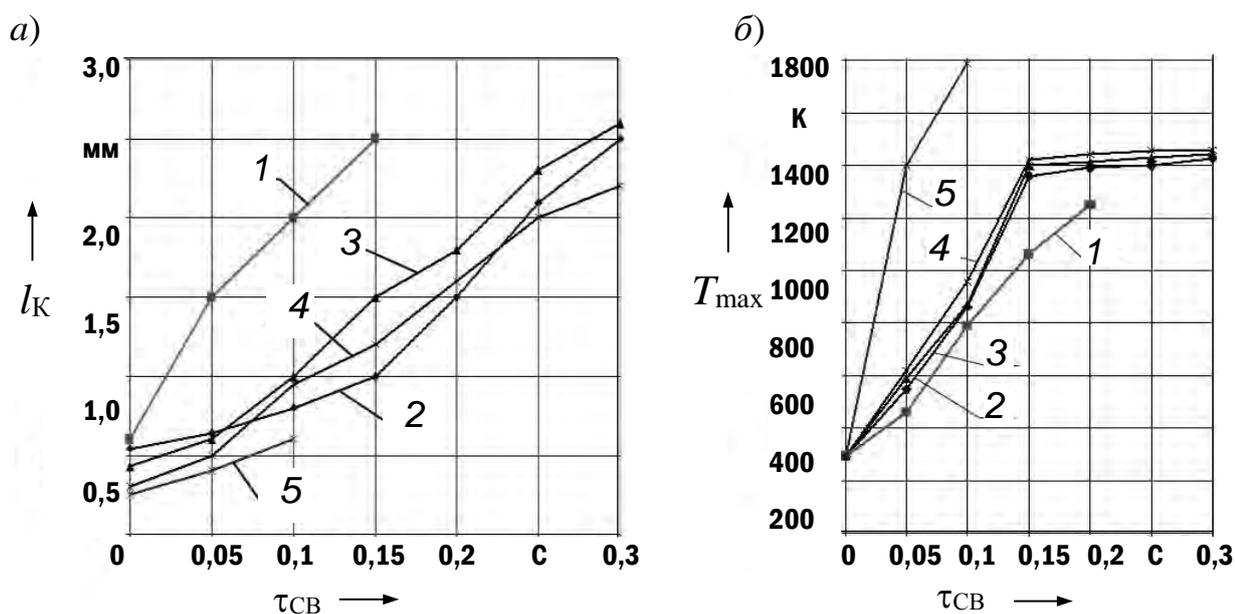
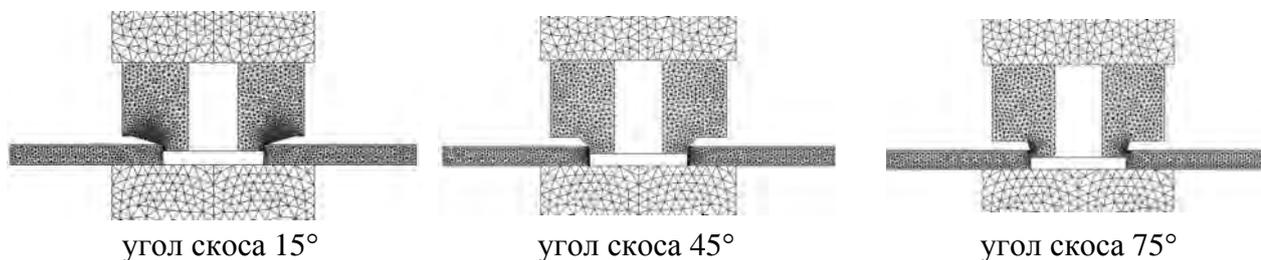
С момента включения сварочного тока происходит активация контактных поверхностей посредством нагрева и пластической деформации под действием усилия сжатия электродов. Металл зоны сварного соединения нагревается до температуры разупрочнения $T > 800$ К (рисунок 4.12, а), что сопровождается продолжением роста контактной площадки l_k .



а – при $t_{св} = 0,12$ с; б – в момент выключения сварочного тока $h_3 = 0$

Рисунок 4.12 – Распределение температурного поля (температура в кельвинах)

Величина угла рельефа α оказывает существенное влияние на температурное поле и размеры контактной площадки l_K в процессе сварки. Как видно из рисунка 4.12, б, необходимая степень деформации рельефа (полная выборка зазора $h_3 = 0$) достигается при углах рельефа $30 \dots 60^\circ$ (рисунок 4.13, кривые 2–4).



1 – угол рельефа $\alpha = 15^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$; 4 – $\alpha = 60^\circ$; 5 – $\alpha = 75^\circ$

Рисунок 4.13 – Рост контактной площадки l_K (а) и максимальной температуры T_{max} в зоне сварного соединения (б) в процессе протекания сварочного тока

При этом в зоне сварки достигается температура $T_{РЕК} \approx 0,8 \cdot T_{ПЛ} \approx 1450$ К, называемая температурным порогом рекристаллизации [4]. Это наименьшая температура, при которой происходит разупрочнение металла и рекристаллизация с возможностью образования соединения в твердой фазе. Рекристаллизация заключается в появлении зародышей, возникновении и росте новых зерен с меньшим количеством дефектов строения взамен деформированных и сопровождается уменьшением основной доли энергии в объеме металла, накопленной в процессе интенсивной пластической деформации. Вследствие одинаковой возможности роста по всем направлениям новые образующиеся из зародышей зерна равноосны, т. е. имеют в среднем одинаковые размеры по всем направлениям. Процесс рекристаллизации происходит во времени с

некоторой скоростью, которая зависит от температуры и степени деформации. Чем выше температура и степень деформации рельефа, тем выше скорость рекристаллизации. Рекристаллизация протекает не во время деформации нагретого металла, а сразу после ее окончания.

Таким образом, обязательным условием получения прочных сварных соединений в твердой фазе при рельефной сварке «острой гранью» является интенсивная пластическая деформация металла рельефа и кромки листовой детали при температурах $T_{\text{РЕК}} < T < T_{\text{ПЛ}}$. При этом преимущественно деформируется кромка пластины, а металл бобышки в радиальном направлении практически не деформируется (см. рисунок 4.12, б), что позволяет успешно реализовывать данный способ сварки для изделий с внутренней резьбой [154].

Величина угла рельефа α оказывает существенное влияние на температурное поле и размеры контакта деталь–деталь в процессе сварки.

При угле рельефа $\alpha = 15^\circ$ (см. рисунок 4.13, кривая 1) быстрый рост l_k снижает интенсивность тепловыделения в зоне контакта (максимальная температура T_{max} к моменту выключения сварочного тока достигает примерно 1300 К, что не обеспечивает качественного процесса сварки в твердой фазе).

При угле рельефа $\alpha = 75^\circ$ (см. рисунок 4.13, кривая 5) достижение высоких температур в зоне сварного соединения происходит при малых значениях контактной площадки ($l_k = 0,6$ мм). Это приводит к прекращению вычислительной процедуры, что равнозначно появлению выплеска при реальном процессе сварки.

Стабильность процесса сварки зависит от скорости нарастания величины сварочного тока, которое должно соответствовать изменению размера контактной площадки l_k при деформации рельефа.

Соблюдение данных условий обеспечивается оптимизацией основных параметров режима сварки, а также формой и размерами свариваемых деталей. В [27, 29, 38, 39] приводятся различные значения угла рельефа ($\alpha = 30, 45$ и 60°), однако на базе проведенных исследований установлено, что угол рельефа следует выбирать в пределах $40...45^\circ$ вне зависимости от типоразмера привариваемой бобышки и толщины листа, а компенсация изменения габаритных размеров изделия осуществляется соответствующим изменением параметров режима сварки и высоты рельефа [181]. Размеры рельефа должны гарантировать сохранение резьбы. В качестве контролируемых параметров, по которым можно оценить ход протекания процесса сварки, могут выступать величина перемещения, скорости либо ускорения перемещения подвижного электрода.

На этапе III формирования сварного соединения существенно падает скорость перемещения подвижного электрода, что объясняется интенсивным ростом размера контактной площадки l_k и некоторым снижением плотности тока. На этом этапе наблюдается значительная пластическая деформация



металла листовой детали и бобышки. В процессе протекания сварочного тока размеры зоны сварки растут, и к моменту выключения сварочного тока металл разогревается до температур порядка 1450 К, что способствует началу рекристаллизации и образованию сварных соединений в твердой фазе (см. рисунок 4.13, кривые 2–4). Окончанием этапа является полная осадка рельефа на всю его высоту и касание торца бобышки с поверхностью листа. Скорость нарастания температуры при этом значительно снижается, что служит сигналом к выключению сварочного тока.

Этап IV начинается с момента выключения сварочного тока. Для получения качественных сварных соединений в твердой фазе необходимо, чтобы длительность этапа объемного взаимодействия $\tau_{ков}$ при проковке низкоуглеродистых сталей была достаточной для образования общих зерен в зоне контакта деталь–деталь, завершения релаксационных процессов и снижения напряжений до требуемого уровня [80].

Проведенный анализ распределения температурного поля и деформаций внутренней стенки бобышки позволил оценить влияние геометрических параметров рельефа на процесс деформирования зоны сварного соединения. В результате установлено, что при выборе угла рельефа $\alpha = 45^\circ$ толщина стенки бобышки t и высота рельефа h_p определяются в зависимости от диаметра резьбы d_o по следующим выражениям [181]:

$$t \geq 0,8 + 0,2d_o ; \quad (4.1)$$

$$h_p = 0,17 \cdot d_o^{0,95} . \quad (4.2)$$

Фактическая площадь получаемого сварного соединения $S_{св}$ определяется конечным размером кольцевой контактной площадки l_k (рисунок 4.14, а) и зависит от размеров привариваемой бобышки:

$$S_{св} = \pi(r + R)l_k = \pi \left(\frac{d_o}{2} + t + \frac{d_o}{2} + t + h_p \right) l_k , \quad (4.3)$$

где R, r – радиусы оснований усеченного конуса, мм.

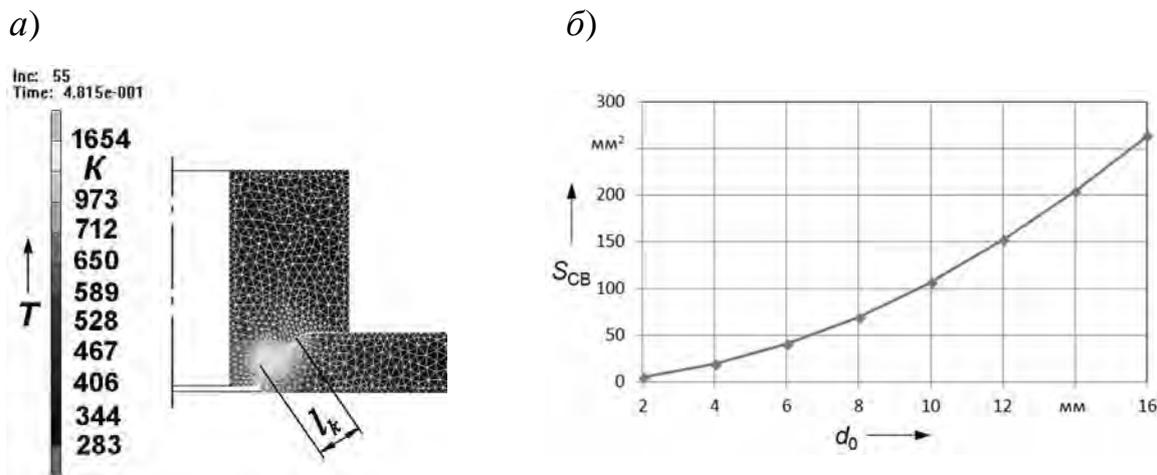
С учетом формул (3.17) и (3.18) имеем зависимость (рисунок 4.14, б)

$$S_{св} = 1,05d_o^{1,95} + 0,13d_o^{1,9} + 0,3d_o^{0,95} . \quad (4.4)$$

Для обеспечения качественного процесса сварки необходимо осуществлять модуляцию величины сварочного тока, что позволяет значительно снизить вероятность возникновения начальных выплесков. Выбор величины сварочного



тока производился исходя из расчетного значения площади сварки и допустимой плотности тока.



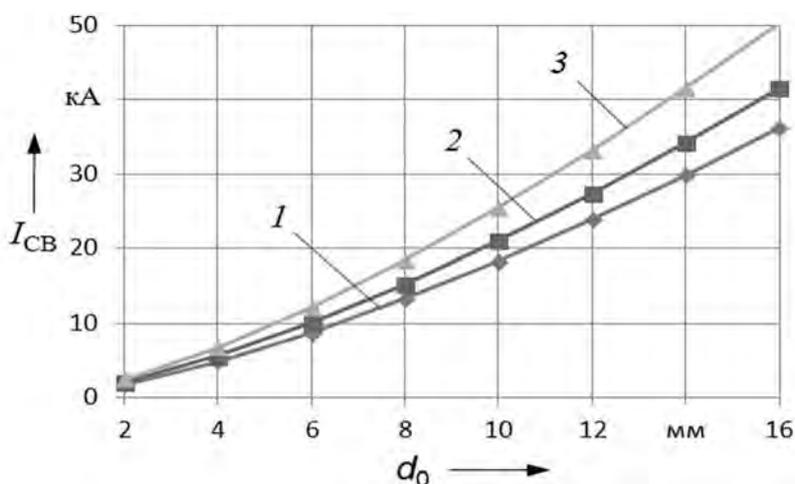
a – размер контактной площадки l_k к концу сварки; *b* – зависимость фактической площади сварного соединения S_{CB} от диаметра резьбового отверстия бобышки d_0

Рисунок 4.14 – Определение фактической площади сварного соединения

Для определения величины сварочного тока I_{CB} и времени его протекания τ_{CB} в зависимости от диаметра отверстия бобышки d_0 , мм, и толщины пластины δ , мм, следует использовать формулы (рисунок 4.15) [181]

$$I_{CB} = 650 \cdot d_0^{1,45} \cdot \delta^{0,1\delta}; \quad (4.5)$$

$$\tau_{CB} = (0,06 + 0,03d_0) \cdot \delta^{0,1\delta}. \quad (4.6)$$



1 – $\delta = 1$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм; 3 – $\delta = 3$ мм

Рисунок 4.15 – Зависимость величины сварочного тока от диаметра отверстия бобышки d_0 и толщины пластины δ при сварке «острой гранью»

Технологические рекомендации по выбору параметров режима рельефной сварки «острой гранью» в зависимости от диаметра отверстия бобышки d_0 при толщине листа $\delta = 2$ мм представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Рекомендации по выбору параметров режима рельефной сварки «острой гранью» (толщина листа 2 мм)

Диаметр отверстия d_0 , мм	Высота рельефа h_R , мм	Угол рельефа α , град	Толщина стенки t , мм	Сварочный ток $I_{св}$, кА	Длительность протекания сварочного тока $\tau_{св}$, с	Усиление сжатия электродов $F_{св}$, кН	Длительность предварительного сжатия $\tau_{сж}$, с	Длительность приложения усилия проковки $\tau_{ков}$, с	Длительность модуляции сварочного тока $\tau_{мод}$, с	Площадь сварки $S_{св}$, мм ²
3	0,5	45	1,4	3,2	0,18	2,5	0,2	0,5	0,04	12
4	0,6		1,6	4,8	0,2	3,5	0,2	0,5	0,04	18
5	0,73		1,8	6,7	0,24	4,2	0,2	0,5	0,06	27
6	0,9		2	8,7	0,28	5,5	0,2	0,5	0,06	40
8	1,2		2,4	13,5	0,34	7,5	0,2	0,5	0,08	71
10	1,5		2,8	18	0,4	9	0,2	0,5	0,08	110
12	1,8		3,2	24	0,48	11	0,2	0,5	0,1	160
16	2,25		4	36	0,62	22	0,2	0,5	0,1	260

Разработка и внедрение в производство технологического процесса рельефной сварки Т-образных соединений «острой гранью» обусловлены следующими сложностями [154]:

- после выполнения сварочной операции резьбовое отверстие должно быть проходным;
- осадка рельефа должна осуществляться на всю его высоту для обеспечения номинальной площади сварного соединения и стабильности прочностных показателей;
- для обеспечения хорошего внешнего вида соединения пластифицированный металл рельефа в процессе сварки не должен вытесняться на лицевые поверхности изделия.

При реализации технологического процесса сварки использовались схема с прямым токоподводом к торцу бобышки и циклограмма с постоянным усилием сжатия электродов и модуляцией сварочного тока в течение времени $\tau_{мод}$ (см. рисунок 4.10, а).

Была произведена сварка бобышек с резьбовым отверстием М6 и пластин толщиной 2 мм из низкоуглеродистой стали Ст3 при следующих параметрах



режима: $I_{СВ} = 8,7$ кА; $\tau_{СВ} = 0,28$ с; $\tau_{МОД} = 0,06$ с; $\tau_{КОВ} = 0,5$ с; $F_{СВ} = F_{КОВ} = 5,5$ кН (см. таблицу 4.1). Несмотря на то, что режим сварки жесткий, металл рельефа успевает разогреться на достаточную глубину, осадка рельефа происходит на всю его величину $h_p = 0,9$ мм. Цилиндричность резьбового отверстия М6 после сварки изменилась не более чем на 0,05 мм. При этом зазор между деталями после сварки составил 5...7 % от толщины листа. Результаты проведенных испытаний соединений на отрыв свидетельствуют о незначительном разбросе значений усилий отрыва, вместе с тем минимальное усилие отрыва составило $F_{ОТР}^{min} = 1830$ Н.

Проведенный анализ характера кривой перемещения подвижного электрода при рельефной сварке (см. рисунок 4.10, б) показал, что данный параметр может использоваться в качестве информативного критерия при создании системы управления процессом сварки. Это даст возможность стабилизировать геометрические параметры сварных соединений, а также обеспечить автоматическое изменение длительности протекания сварочного тока в зависимости от величины осадки рельефа.

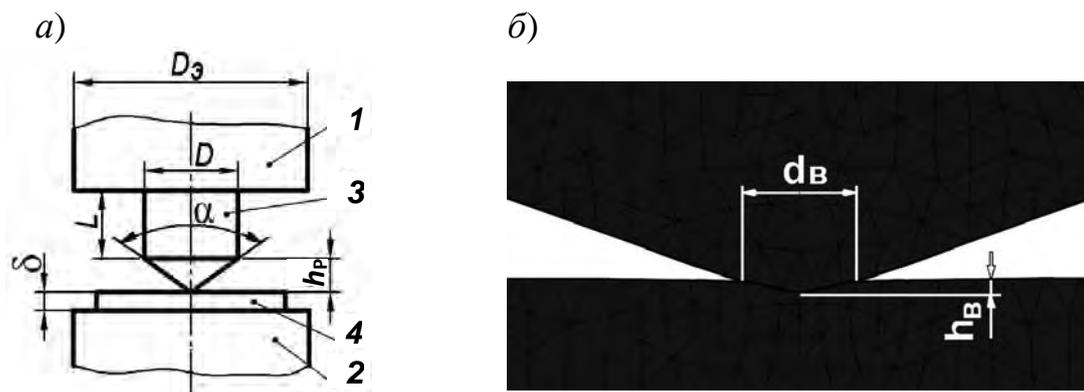
Разработанный технологический процесс сварки «острой гранью» позволил снизить деформации внутренней стенки бобышки, обеспечить стабильность прочностных показателей сварных соединений за счет минимизации зазоров между свариваемыми деталями и полной осадки рельефа на всю его высоту, сохранить резьбовое отверстие бобышки проходным и улучшить товарный вид изделия [154].

4.3 Методика определения параметров режима рельефной сварки Т-образных сварных соединений типа стержень–лист

Схема изучаемого процесса Т-образной рельефной сварки цилиндрического стержня диаметром $D = 16$ мм с листом толщиной $\delta = 3$ мм представлена на рисунке 4.16, а. Материалом свариваемых деталей является низкоуглеродистая сталь Ст3 [77, 78, 81].

Цикл сварки начинается с этапа предварительного сжатия деталей и создания между ними механического контакта. Наличие предварительной холодной деформации рельефа способствует стабилизации электрического сопротивления сварочного контакта деталь–деталь. Величина начальной площади контакта деталь–деталь зависит от формы и размеров рельефа, усилия сжатия электродов и механических свойств свариваемых материалов. Контакт между деталями устанавливается по вершине рельефа, которая частично сминается и вдавливается в противолежащий лист с образованием зоны внедрения диаметром d_B и глубиной h_B (рисунок 4.16, б).

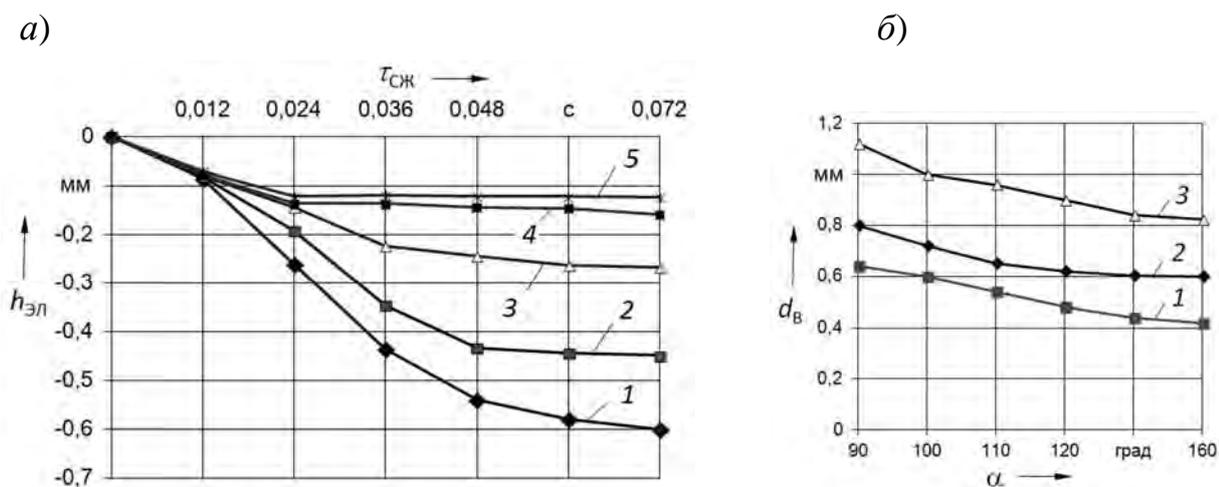




1, 2 – токоподводящие электроды; 3 – стержень; 4 – лист; $D_{\text{э}}$ – диаметр электрода; D – диаметр стержня; $h_{\text{р}}$ – высота рельефа; α – угол рельефа; δ – толщина пластины; L – установочная длина стержня; $d_{\text{в}}$ и $h_{\text{в}}$ – диаметр и глубина зоны внедрения

Рисунок 4.16 – Схема процесса рельефной Т-образной сварки стержня с листом (а) и моделирование внедрения рельефа в листовую деталь (б)

С помощью математической модели процесса рассчитана величина перемещения верхнего подвижного электрода в ходе предварительного сжатия деталей постоянным усилием при углах рельефа в диапазоне $90 \dots 170^\circ$. Высота зоны внедрения $h_{\text{в}}$ достаточно точно определяется по величине перемещения электрода $h_{\text{эл}}$. Установлено, что при углах рельефа $\alpha = 90 \dots 100^\circ$ происходит интенсивное внедрение рельефа в листовую деталь, что сопровождается ростом глубины зоны внедрения $h_{\text{в}}$ и величины перемещения подвижного электрода $h_{\text{эл}}$ (рисунок 4.17, а, кривые 1, 2).



а – перемещение подвижного электрода $h_{\text{эл}}$ при угле рельефа (1 – $\alpha = 90^\circ$; 2 – $\alpha = 100^\circ$; 3 – $\alpha = 110^\circ$; 4 – $\alpha = 120^\circ$; 5 – $\alpha = 140^\circ$); б – изменение диаметра зоны внедрения $d_{\text{в}}$ рельефа в листовую деталь в зависимости от угла рельефа α (1 – $F_{\text{св}} = 2$ кН; 2 – $F_{\text{св}} = 2,5$ кН; 3 – $F_{\text{св}} = 3$ кН)

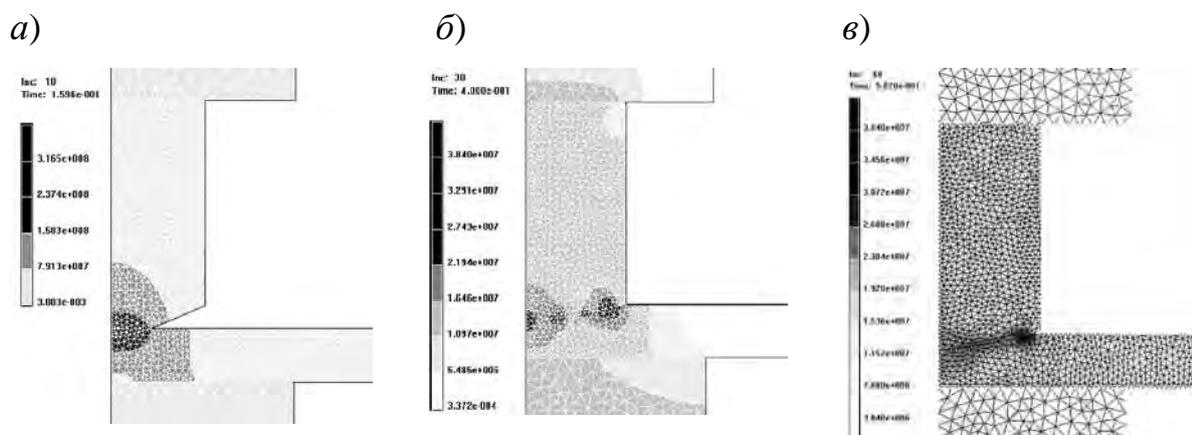
Рисунок 4.17 – Образование начального контакта деталь–деталь



Вместе с тем диаметр зоны внедрения d_B определяется главным образом величиной усилия сжатия электродов и в меньшей степени зависит от угла рельефа α (рисунок 4.17, б). Поэтому размеры зоны внедрения d_B и h_B преимущественно определяются величиной усилия сжатия электродов F_{CB} . Как показали проведенные вычислительные эксперименты, после предварительного сжатия в течение $\tau_{CЖ} = 0,2$ с в среднем диаметр контакта деталь–деталь d_B не превышает 0,5...1 мм. Следовательно, при выборе величины сварочного тока необходимо исходить из условия обеспечения максимально допустимой плотности тока в зоне данного контакта.

В качестве примера приведены результаты моделирования процесса рельефной сварки стержня диаметром 16 мм с листовой деталью толщиной 3 мм при следующих параметрах режима: угол рельефа $\alpha = 150^\circ$; сварочный ток $I_{CB} = 22$ кА; время предварительного сжатия $\tau_{CЖ} = 0,2$ с; время протекания сварочного тока $\tau_{CB} = 0,5$ с; время модуляции сварочного тока $\tau_{МОД} = 0,08$ с; усилие сжатия электродов $F_{CB} = 14$ кН [81].

Из результатов моделирования видно, что при пропускании тока в течение времени $\tau_{CB} = 0,16$ с (рисунок 4.18, а) максимальная плотность тока ($j_{CB} = 316,5$ А/мм²) наблюдается в центральной зоне соединения из-за малой начальной площади контакта свариваемых деталей. При дальнейшем нагреве металла рельефа до температур разупрочнения и переходе его в пластическое состояние ($\tau_{CB} = 0,4$ с) происходит соответствующий рост контактной поверхности деталь–деталь, что приводит к перераспределению и снижению максимальной величины плотности тока до $j_{CB} = 38,4$ А/мм² (рисунок 4.18, б). В конце процесса сварки ($\tau_{CB} = 0,5$ с) плотность тока распределена практически равномерно по сечению свариваемых деталей, однако наибольшая концентрация линий тока наблюдается на границе контакта деталей (рисунок 4.18, в).



а – $\tau_{CB} = 0,16$ с; б – $\tau_{CB} = 0,4$ с; в – $\tau_{CB} = 0,5$ с

Рисунок 4.18 – Распределение плотности тока j_{CB} , А/мм², в процессе сварки

Величина и характер распределения плотности тока оказывают определяющее влияние на температурное поле в зоне сварного соединения.

При пропуске модулированного сварочного тока в течение $\tau_{\text{СВ}} = 0,1$ с металл рельефа и прилегающей зоны листовой детали нагревается до температуры $T \approx 400$ К (рисунок 4.19, а), рельеф деформируется незначительно, но происходит модификация сетки конечных элементов в зоне контакта деталей и ее адаптация к дальнейшему протеканию тока.

В течение времени $\tau_{\text{СВ}} = 0,2$ с металл рельефа и листовой детали нагревается до температуры разупрочнения $T \approx 800$ К (рисунок 4.19, б), начинается интенсивное смятие рельефа, вызванное нагревом металла, растет скорость перемещения верхнего электрода и диаметр контакта деталь–деталь d_k . При этом значительной пластической деформации подвергается металл стержня, в то время как в листовой детали имеет место лишь эффект деформации контактной поверхности.

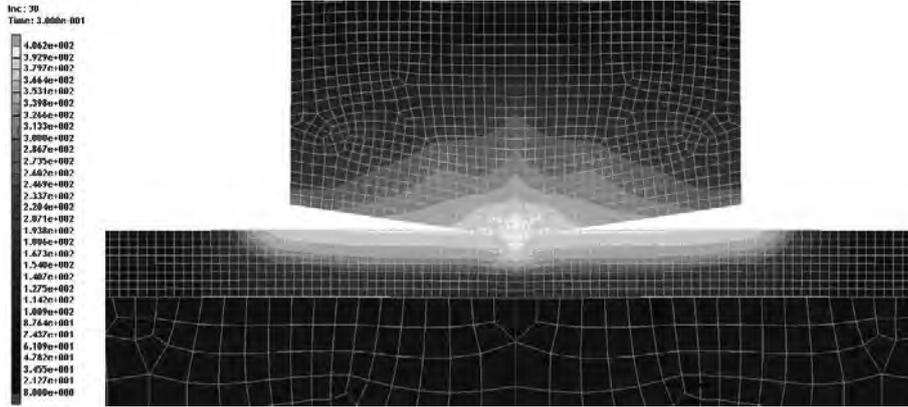
За время $\tau_{\text{СВ}} = 0,3$ с завершается осадка рельефа, интенсивность пластической деформации металла и скорость перемещения верхнего электрода заметно снижаются (рисунок 4.19, в). При дальнейшем протекании сварочного тока ($\tau_{\text{СВ}} = 0,5$ с) наблюдается процесс глубинного разогрева соединения (рисунок 4.19, г), максимальная температура достигает величины $T \approx 1500$ К, что свидетельствует о превышении температурного порога рекристаллизации $T_{\text{РЕК}} \approx 1450$ К и образовании соединения в твердой фазе.

При этом можно наблюдать несимметричность температурного поля в деталях. От поверхности контакта деталь–деталь тепло распространяется фронтально вдоль оси стержня и в направлениях, нормальных к некоторой сферической поверхности в теле другой детали.

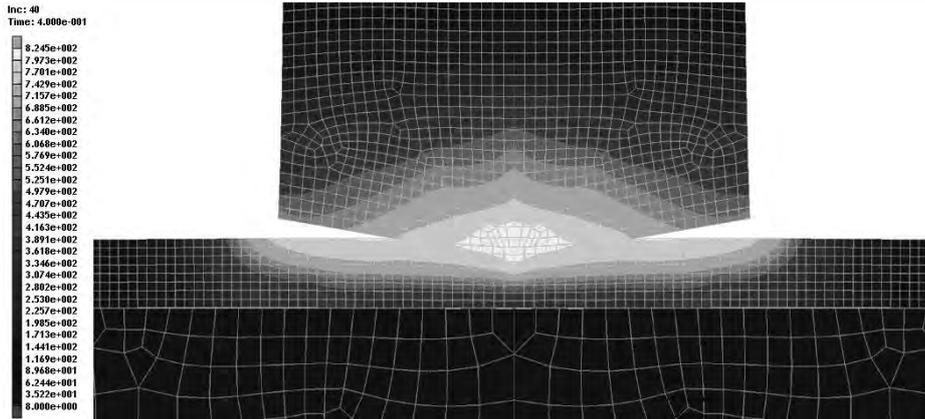
Это различие вызвано разными условиями теплоотвода по обе стороны от поверхности контакта деталь–деталь. Градиенты температур оказываются различными из-за того, что листовая деталь имеет больший диаметр контакта с электродом, а зона сварки расположена ближе к охлаждаемым поверхностям электродов. Интенсивный теплоотвод в нижний электрод может привести к образованию непровара, так как нижняя деталь не разогреется до температур, необходимых для формирования сварного соединения в твердой фазе.

Тепловое равновесие может быть компенсировано уменьшением диаметра нижнего электрода. При этом изменяется характер распределения плотности тока в сварном соединении [154]. Сварка электродом, равным диаметру привариваемого стержня, обеспечивает более равномерную картину распределения сварочного тока по сечению листовой детали (рисунок 4.20), что позволяет более интенсивно нагревать нижнюю деталь и компенсировать тепловые потери из-за теплоотвода в нижний электрод.

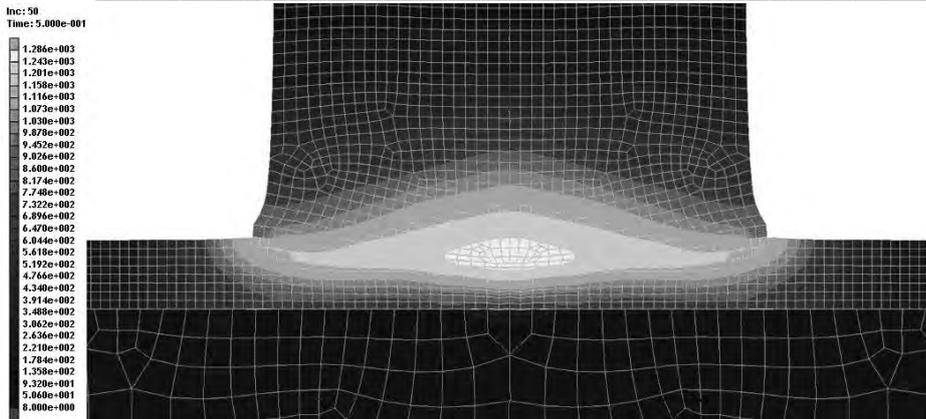
a)



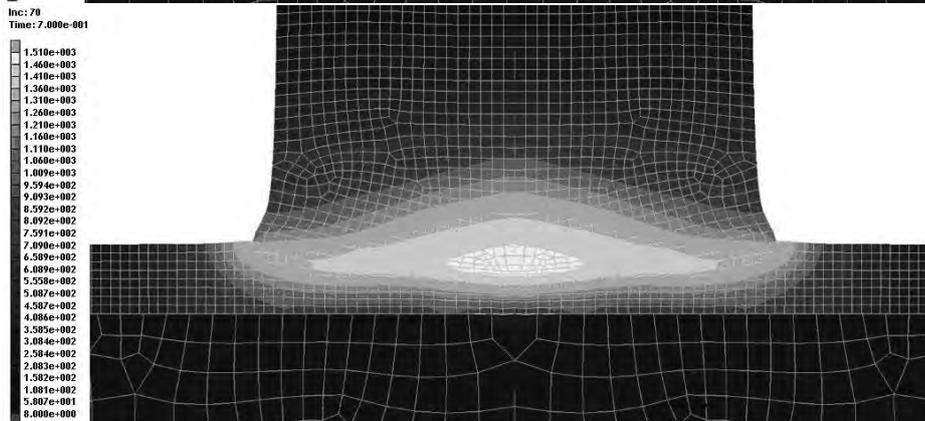
б)



в)



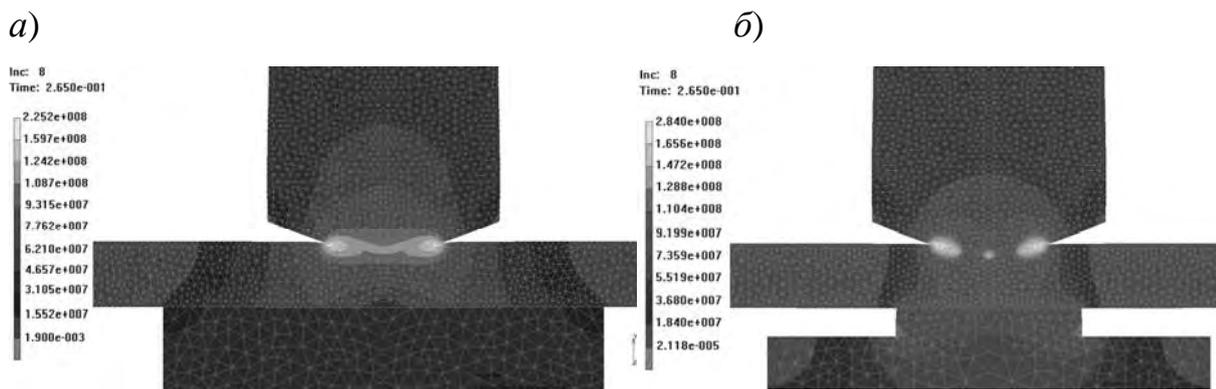
г)



a – время протекания тока $\tau_{CB} = 0,1$ с; *б* – $\tau_{CB} = 0,2$ с; *в* – $\tau_{CB} = 0,3$ с; *г* – $\tau_{CB} = 0,5$ с

Рисунок 4.19 – Распределение температурного поля и деформаций в процессе сварки (время предварительного сжатия $\tau_{CЖ} = 0,2$ с)



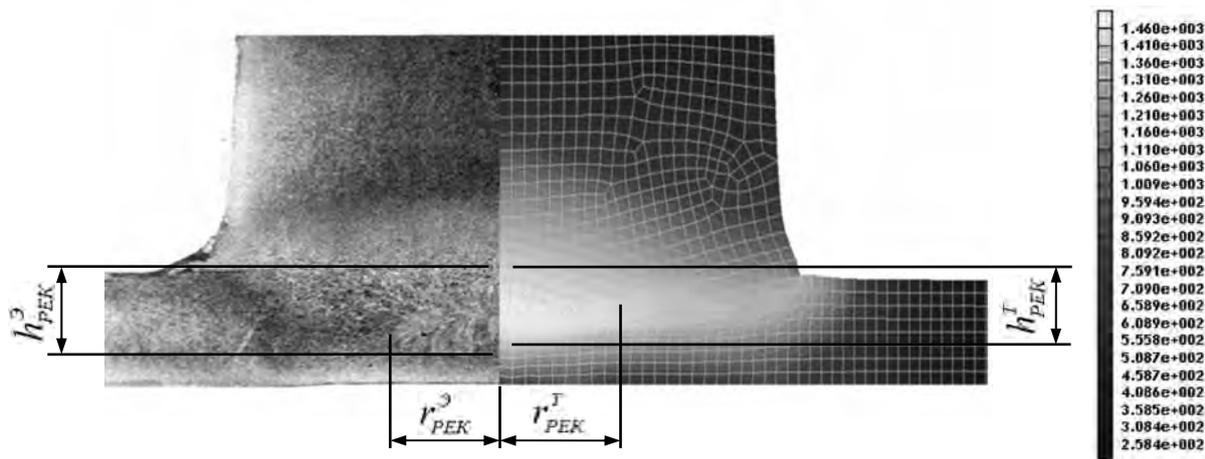


a – при сварке электродом большого диаметра; *б* – электродом малого диаметра

Рисунок 4.20 – Распределение плотности тока j_{CB} в зоне соединения

Однако уменьшение диаметра нижнего электрода менее диаметра, равного $d_3 = (8...10)\delta$, может привести к образованию вмятины на поверхности плоской детали и тем самым неблагоприятно скажется на точности геометрических размеров деталей.

Оценку адекватности разработанной математической модели проводили при сравнении расчетных данных с макрошлифом сварного соединения стержня диаметром 16 мм с пластиной из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм (рисунок 4.21). Так как максимальная температура в зоне сварки достигает величины свыше $T \approx 1460$ К, на макрошлифе сварного соединения можно наблюдать зону рекристаллизации с образованием новых равноосных зёрен в металле вместо деформируемых.



$r_{PEK}^{\text{э}}$, $r_{PEK}^{\text{т}}$ – экспериментальный и теоретический радиусы зоны рекристаллизации;
 $h_{PEK}^{\text{э}}$, $h_{PEK}^{\text{т}}$ – экспериментальная и теоретическая высоты зоны рекристаллизации

Рисунок 4.21 – Оценка адекватности результатов математического моделирования при сравнении с макрошлифом сварного соединения (температура в кельвинах)

Отклонение расчетных и экспериментальных данных при определении радиуса и высоты зоны рекристаллизации ($\epsilon = 8...10\%$) объясняется рядом допущений, принятых при разработке математической модели, а также погрешностью измерений. Причина количественных отклонений заключается в недостатке данных о реальных характеристиках свариваемых материалов при температурах, близких к температуре плавления [81].

В ходе расчетов было определено влияние угла рельефа α на характер распределения плотности тока, величину теплогенерации в зоне сварного соединения и процесс осадки рельефа.

Стабильность процесса сварки на данном этапе зависит от соблюдения следующих условий:

- наличие плавного увеличения сварочного тока, компенсирующего малый диаметр контакта деталь–деталь в момент включения сварочного тока;
- нарастание величины сварочного тока должно соответствовать изменению диаметра контакта деталь–деталь d_k при деформации рельефа.

Соблюдение вышеуказанных условий обеспечивается оптимизацией основных параметров режима сварки (величины и длительности протекания сварочного тока, усилия сжатия электродов), а также формой и размерами применяемых рельефов.

Оптимизация формы рельефа проводилась исходя из необходимости обеспечения интенсивной пластической деформации металла рельефа в процессе сварки. Характер деформации рельефа в процессе осадки способствует симметричному выдавливанию из плоскости контакта деталь–деталь поверхностных слоев металла и взаимодействию более глубоких слоев, имеющих ювенильные поверхности [78].

Выбор оптимальной формы рельефа осуществлялся по критерию максимальной пластической деформации в зоне сварки. Степень деформации ϵ_p в зоне соединения при этом рассчитывается по формуле

$$\epsilon_p = \frac{h_p - h_3}{h_p}, \quad (4.7)$$

где h_3 – величина зазора между деталями, м;

h_p – высота рельефа, м.

Анализ теоретически полученных кривых перемещения подвижного электрода в процессе сварки показал, что с момента включения сварочного тока и до $\tau_{св} = 0,1$ с (стадия активации контактных поверхностей) при использовании конической формы рельефа наблюдается наибольшая степень деформации ($\epsilon_p = 32...33\%$) [154].

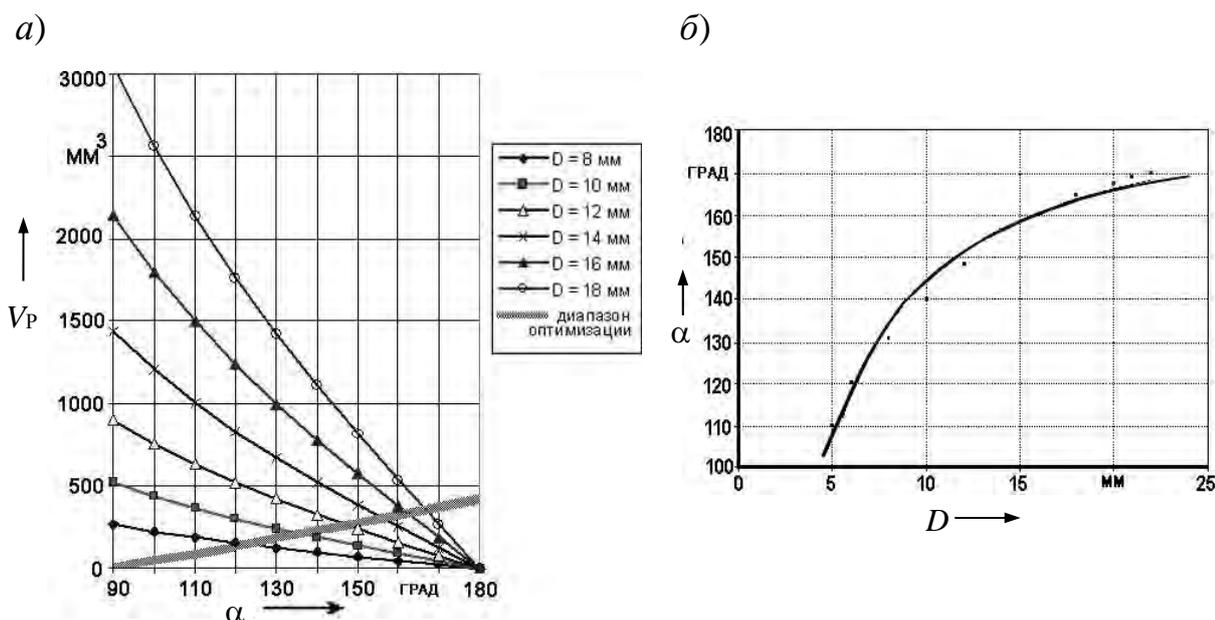


Исходя из геометрических соотношений, объем металла рельефа V_P определяется двумя величинами: диаметром привариваемого стержня D и углом рельефа α :

$$V_P = \frac{1}{3} \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_P = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{D^3}{\operatorname{tg}(\alpha/2)}. \quad (4.8)$$

На основании проведенных вычислительных экспериментов установлено, что объем рельефа должен быть прямо пропорционален диаметру привариваемого стержня и при $D = 5 \dots 25$ мм находиться в диапазоне $200 \dots 500$ мм³.

Для нахождения угла рельефа использовался диапазон оптимизации (рисунок 4.22, а), построенный исходя из условия, что в процессе сварки весь объем металла рельефа должен быть разогрет до температуры образования соединения в твердой фазе. При этом необходимо обеспечить применение жестких режимов сварки для снижения энергоемкости процесса, а также стабильность прочностных показателей и точность геометрических размеров сварных соединений.



а – расчет объема рельефа в зависимости от геометрических параметров сварного соединения; б – зависимость угла рельефа от диаметра привариваемого стержня D

Рисунок 4.22 – Выбор угла рельефа

Выполнение данных условий обеспечивается, если угол рельефа выбирать в пределах $120 \dots 170^\circ$ при диаметрах стержней $D = 5 \dots 25$ мм исходя из следующей зависимости (рисунок 4.22, б) [154]:

$$\alpha = 180 - 350/D \pm 1. \quad (4.9)$$

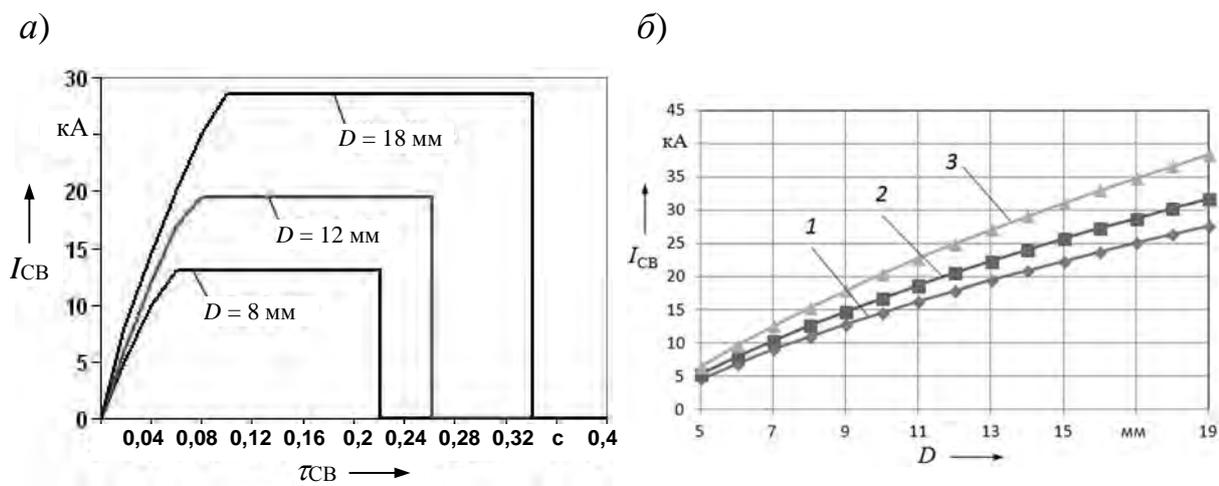
На рисунке 4.23 представлены практические рекомендации по выбору значения сварочного тока при диаметрах стержней в диапазоне 5...19 мм и различных толщинах листов при сварке низкоуглеродистых сталей.

При реализации технологического процесса рельефной сварки компенсацию изменения площади контакта деталь-деталь в процессе протекания сварочного тока осуществляли за счет применения модуляции импульсов тока в течение времени 0,04...0,08 с (см. рисунок 4.23, а). Изменение сварочного тока в зависимости от величины осадки рельефа учитывалось при расчете длительности модуляции импульсов сварочного тока.

Расчет действующей величины переменного сварочного тока и времени его протекания в зависимости от диаметра стержня D и толщины листа δ осуществлялся по формулам (см. рисунок 4.23, б)

$$I_{CB} = (10,8\sqrt{D} - 19,5) \cdot 1000 \cdot \delta^{0,1\delta}; \quad (4.10)$$

$$\tau_{CB} = (0,06 + 0,02D) \cdot \delta^{0,1\delta}. \quad (4.11)$$



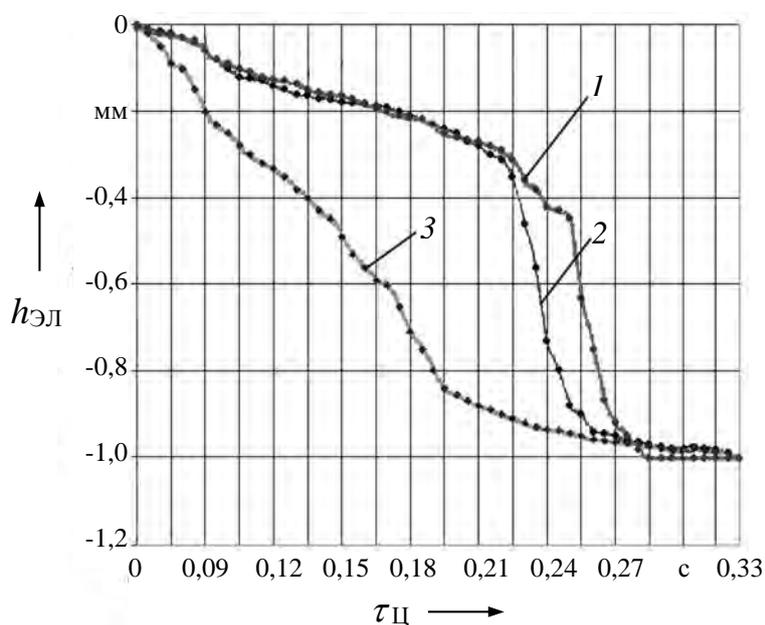
а – изменение тока в процессе сварки; б – зависимость тока от диаметра стержня: 1 – толщина пластины $\delta = 1$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм; 3 – $\delta = 3$ мм

Рисунок 4.23 – Выбор величины сварочного тока I_{CB} при рельефной сварке стержня с листом

Ход протекания процесса сварки можно оценить по величине перемещения подвижного электрода. С целью исследования влияния на процесс сварки усилия сжатия электродов применялась математическая модель рельефной сварки с диаметром привариваемого стержня 16 мм, толщиной листа 2 мм и углом при вершине рельефа 150° . При сохранении постоянными основных



параметров режима сварки изменяли усилие сжатия электродов при сварке в пределах от 5 до 8 кН (рисунок 4.24).



1 – $F_{СВ} = 5$ кН; 2 – $F_{СВ} = 6,5$ кН; 3 – $F_{СВ} = 8$ кН

Рисунок 4.24 – Перемещение верхнего электрода $h_{ЭЛ}$ в процессе сварки

Удовлетворительные результаты сварки получаются при усилиях сжатия $F_{СВ} = 5 \dots 6,5$ кН (см. рисунок 4.24, кривые 1, 2), удельное давление в зоне сварного соединения при этом должно составлять $p_{уд} = 80$ МПа [1, 2, 4, 27]. При значительном увеличении усилия сжатия электродов $F_{СВ} = 8$ кН происходит преждевременное смятие рельефа и интенсивный рост диаметра контакта (см. рисунок 4.24, кривая 3). Это приводит к существенному снижению плотности тока и величины теплогенерации в зоне образования сварного соединения. Температура в зоне сварного соединения не достигает температуры, при которой происходит формирование качественного сварного соединения.

Полученные обобщенные рекомендации по выбору основных параметров режима сварки представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Выбор параметров режима рельефной сварки стержней с листом толщиной 2 мм

Диаметр стержня D , мм	Угол рельефа α , град	Сварочный ток $I_{св}$, А	Длительность протекания сварочного тока $\tau_{св}$, с	Усиление сжатия электродов $F_{св}$, Н	Длительность предварительного сжатия $\tau_{сж}$, с	Длительность приложения ковочного усилия $\tau_{ков}$, с	Длительность модуляции сварочного тока $\tau_{мод}$, с	Площадь сварки $S_{св}$, мм ²
5	105	5300	0,18	3200	0,2	0,5	0,04	19,6
6	120	7600	0,2	4200	0,2	0,5	0,04	28,3
7	128	10300	0,22	5000	0,2	0,5	0,04	38,5
8	134	13000	0,24	5600	0,2	0,5	0,06	50,2
9	140	15500	0,28	7000	0,2	0,5	0,06	63,6
10	144	17000	0,3	10000	0,2	0,5	0,06	78,5
11	148	18200	0,32	12000	0,2	0,5	0,06	95
12	150	19500	0,34	13500	0,2	0,5	0,06	113
13	154	21000	0,38	14000	0,2	0,5	0,06	132,6
14	156	22000	0,4	14500	0,2	0,5	0,06	153,8
15	158	23000	0,42	15000	0,2	0,5	0,06	176,6
16	160	24500	0,44	15600	0,2	0,5	0,08	200,9
17	162	26300	0,46	16100	0,2	0,5	0,08	226,8
18	163	28500	0,48	16500	0,2	0,5	0,08	254,3
19	164	30000	0,5	18000	0,2	0,5	0,1	283,4
20	165	32000	0,52	21000	0,2	0,5	0,1	314

Выводы

В результате проведенного математического моделирования определено, что кинетика формирования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке характеризуется четырьмя этапами:

- 1) совместной деформацией рельефа и листовой детали на этапе предварительного сжатия;
- 2) интенсивной высокоскоростной деформацией деталей в начальный период протекания сварочного тока;
- 3) снижением скорости осадки рельефа к концу процесса нагрева;
- 4) окончательным формированием сварного соединения под действием усилия проковки.

Анализ характера кривой перемещения подвижного электрода при рельефной сварке показал, что данный параметр может использоваться в качестве информативного критерия при создании системы управления процессом с целью стабилизации геометрических параметров сварных соединений, а также обеспечения автоматического изменения длительности протекания сварочного тока в зависимости от скорости осадки рельефа.

Даны технологические рекомендации по выбору параметров режима рельефной сварки «острой гранью» в зависимости от диаметра резьбового отверстия бобышки d_0 при толщине листа $\delta = 2$ мм.

Разработан технологический процесс сварки «острой гранью», позволяющий снизить деформации внутренней стенки бобышки, обеспечить стабильность прочностных показателей сварных соединений за счет минимизации зазоров между свариваемыми деталями и полной осадки рельефа на всю его высоту, сохранить резьбовое отверстие бобышки проходным и улучшить товарный вид изделия.

Теоретически обоснован выбор формы и размеров рельефов для сварки стержней с листовыми деталями из низкоуглеродистых сталей. Предложена методика расчета величины сварочного тока в зависимости от диаметра привариваемого стержня и толщины листа.

Установлено, что тепловое равновесие может быть компенсировано уменьшением диаметра нижнего электрода. Сварка электродом, равным диаметру привариваемого стержня, обеспечивает равномерную картину распределения сварочного тока по сечению листовой детали, что позволяет более интенсивно нагревать нижнюю деталь и компенсировать тепловые потери из-за теплоотвода в нижний электрод.

Даны практические рекомендации по выбору параметров режима рельефной сварки стержней диаметром 5...20 мм с листом толщиной 2 мм.



5 Разработка технологического процесса рельефной сварки с автоматическим регулированием энергии тепловложения в межэлектродную зону

5.1 Разработка системы активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

В стабилизирующих системах управления контактной сваркой происходит поддержание величин выбранных параметров режима около заданного значения, т. е. стабилизация условий сварки. Эти условия определяются таким образом, чтобы их соблюдение автоматически компенсировало влияние возмущающих факторов.

Одним из способов стабилизации условий сварки является так называемый активный контроль, при котором процесс сварки прекращается по достижении определенным параметром наперед заданного значения. Такими параметрами могут быть, например, интегралы от тока или напряжения, значение вложенной электрической энергии в межэлектродную зону или достигнутое перемещение подвижного электрода [22, 54].

Стабильное качество сварного соединения обеспечивается при условии вложения необходимого количества тепла в зону сварки. Воздействие же различных возмущений (колебание напряжения сети, состояние поверхности свариваемых деталей, износ сварочных электродов) приводит к отклонению реального тепловыделения от заданного, что является причиной возникновения дефектов сварки.

Существующие способы регистрации тепловыделения на участке электрод–электрод предусматривают измерение мгновенных значений падения напряжения между электродами $u_{\text{ЭЭ}}$ и сварочного тока во вторичном контуре i_2 . Интегрирование произведения этих величин позволяет оценить энергию, выделяемую в межэлектродной зоне.

При расчете действующих значений тока I_2 и напряжения $U_{\text{ЭЭ}}$ участка электрод–электрод тепловыделение q за период сварочного тока T может быть вычислено по закону Джоуля–Ленца как

$$q = I_2^2 \cdot R_{\text{ЭЭ}} \cdot T = I_2 \cdot U_{\text{ЭЭ}} \cdot T, \quad (5.1)$$

где $R_{\text{ЭЭ}}$ – активное сопротивление межэлектродной зоны, которое носит динамический характер, вследствие чего среднее за период значение этого сопротивления может быть принято исходя из действующих значений тока и напряжения, $R_{\text{ЭЭ}} = U_{\text{ЭЭ}} / I_2$.



Тогда вычисление суммарного тепловложения Q_{Σ} на участке электрод–электрод при контактной сварке за m периодов сетевого напряжения можно свести к формуле

$$Q_{\Sigma} = \sum_{n=1}^m q_n. \quad (5.2)$$

Для стабилизации тепловыделения за весь цикл сварки используется активный контроль, при котором измеряют и суммируют электрическую энергию, выделяемую в сварочном контакте с начала подачи сварочного тока до текущего момента, и отключают сварочный ток при достижении электрической энергией заданного значения. Такое регулирование позволяет поддерживать постоянство выделяемой энергии на участке электрод–электрод и компенсировать большинство возмущений, действующих на процесс сварки, однако следует учитывать, что увеличение длительности цикла сварки приводит к сдвигу теплового баланса в сторону роста теплоотвода в сварочные электроды и основной металл, что влечет за собой снижение стабильности качества [54]. Компенсация этих потерь осуществляется повышением суммарного тепловложения Q_{Σ} при расчете по уравнению теплового баланса [1, 4].

Таким образом, регулирование тепловложения при контактной рельефной сварке позволит за счет стабилизации тепловложения в межэлектродную зону снизить вероятность возникновения выплесков и непроваров и повысить прочностные характеристики соединений независимо от воздействия таких возмущающих факторов, как колебания сетевого напряжения, качество подготовки изделий перед сваркой, изменения активного сопротивления межэлектродного промежутка и общего сопротивления сварочного контура и др.

Разработанная система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке построена на базе машины контактной точечной сварки МТ-3201 с регулятором цикла сварки РКС-801 [48, 51]. На сегодняшний день на заводах постсоветского пространства довольно широко распространены регуляторы цикла сварки типа РКС-801, которыми укомплектовываются различные машины для управления процессом контактной сварки путем задания и отработки необходимой циклограммы. Главные достоинства данных регуляторов – простота в настройке и удовлетворительная ремонтпригодность. Основные их недостатки заключаются в невозможности автоматической корректировки первоначально настроенных параметров режима сварки в том случае, если на процесс внезапно начинают оказывать влияние возмущающие воздействия. Кроме того, на регуляторе невозможно задавать импульсы сварочного тока сложной формы (можно задавать только модулированный импульс тока с плавным нарастанием до максимального значения в течение заданного количества периодов).



Для устранения вышеуказанных недостатков регулятора используется система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке, которая выполняет следующие задачи:

- внешнее воздействие на аппаратуру управления контактной машины с целью независимого программного задания величины и длительности протекания сварочного тока;
- обеспечение введения в зону сварки точного количества электрической энергии для формирования сварного соединения требуемых размеров и формы, что, в свою очередь, гарантирует и стабильность его прочностных характеристик;
- учет инерционности пневмопривода контактной машины, т. е. включение сварки и программная обработка сигналов напряжения и тока должны начинаться после выдержки предварительного сжатия электродов;
- использование системы автоматического регулирования не должно снижать производительность труда сварщика.

Разработанная система активного контроля позволила задавать расчетные значения тепловложения на отдельных этапах кинетики формирования соединения с помощью платы сбора данных National Instruments NI-USB и универсального программного комплекса LabVIEW. Внешнее управление регулятором цикла сварки дало возможность стабилизировать величину вводимой энергии и длительность протекания сварочного тока непосредственно в процессе сварки без прерывания технологического цикла, т. е. в режиме реального времени.

NI-USB – это универсальный аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователь, представляющий собой цифровую портативную микросхемную плату, которая позволяет регистрировать различные электрические сигналы, поступающие на ее входы, и формировать выходные аналоговые и цифровые сигналы управления.

Устройство NI-USB содержит один аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA) обеспечивает усиление входного сигнала в дифференциальной схеме подключения. Коэффициент усиления вычисляется автоматически на основании диапазона входных напряжений. АЦП выполняет дискретизацию аналогового сигнала, то есть переводит его в цифровой код. Устройство NI-USB может осуществлять как однократное, так и многократное аналого-цифровое преобразование большого количества выборок. Буфер операций аналогового ввода (AI FIFO) служит для хранения получаемых данных во избежание их потери во время операции аналогового ввода.

LabVIEW – программный комплекс для создания и использования виртуальных приборов, позволяющий создавать программы для сохранения и анализа сигналов, полученных с помощью устройства NI-USB. Эта программа дает возможность не только имитировать электротехнические приборы,



датчики, регуляторы и т. д., но и программировать ход протекающих через них электрических сигналов вне зависимости от их типа и величины благодаря мощной инструментальной библиотеке данного программного продукта.

При использовании устройства NI-USB и программной среды LabVIEW возможно реализовать идею автоматического регулирования основных параметров режима рельефной сварки в режиме реального времени с целью введения в зону формирования соединения расчетного количества электрической энергии, что позволит не только обеспечить прочность соединения, но и сэкономить электроэнергию, потребляемую контактной машиной.

Входными параметрами в системе активного контроля являлись расчетное количество электрической энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимое в межэлектродную зону, и величина сварочного тока I_2 . Расчет текущего значения энергии теплового вложения производился на основе анализа регистрируемых мгновенных сигналов напряжения между электродами $u_{ЭЭ}$ (датчик напряжения с зажимами для закрепления на электродах сварочной машины) и сварочного тока i_2 (датчик тока на эффекте Холла ДТПХ-32000) непосредственно в процессе сварки.

Выходным параметром при этом являлась длительность протекания сварочного тока $\tau_{св}$. Корректировка данного параметра осуществлялась с помощью имитационной модели в программной среде LabVIEW посредством воздействия импульсами напряжения с цифровых выходов аналого-цифрового преобразователя напряжений NI-USB 6251 на позиции регулятора цикла сварки РКС-801, такие как «Предварительное сжатие» и «Ограничение импульса тока». Величина сварочного тока задавалась путем программного воздействия двух аналоговых выходов платы NI-USB на позиции регулятора «Нагрев 1» и «Нагрев 2». При разработке аппаратной части системы автоматического регулирования для подключения платы NI-USB к РКС-801 и усиления аналоговых и цифровых сигналов управления было разработано специальное устройство согласования (рисунки 5.1) [183, 184].

Цепь регулирования аналоговых сигналов построена на базе двух операционных усилителей DA1 и DA2 и позволяет задавать величину управляющих импульсов напряжения U_y в пределах 0...10 В при токе потребления 15 мА. Запитывание цепи осуществляется внешним двухполярным источником питания ± 12 В. Операционные усилители позволяют производить регулировку сигналов напряжения управления U_y переменными резисторами R7, R8 в обратной связи и изменять коэффициент усиления сигнала. Соответственно, регулируется амплитуда первого и второго импульсов сварочного тока на позициях регулятора «Нагрев 1» и «Нагрев 2».

Цепь усиления цифровых сигналов построена на базе двух оптронов D1 и D2 и внешнего однополярного источника управления циклом сварки +5 В. Два цифровых сигнала управляют включением и выключением сварочного тока, воздействуя на входы регулятора цикла сварки РКС-801 «Предва-



рительное сжатие» и «Прекращение сварочного тока». При этом первый цифровой сигнал осуществляет включение сварочного тока, а второй – выключение сварочного тока в момент времени, соответствующий условию достижения энергией, вводимой в межэлектродную зону, заданного расчетного значения.

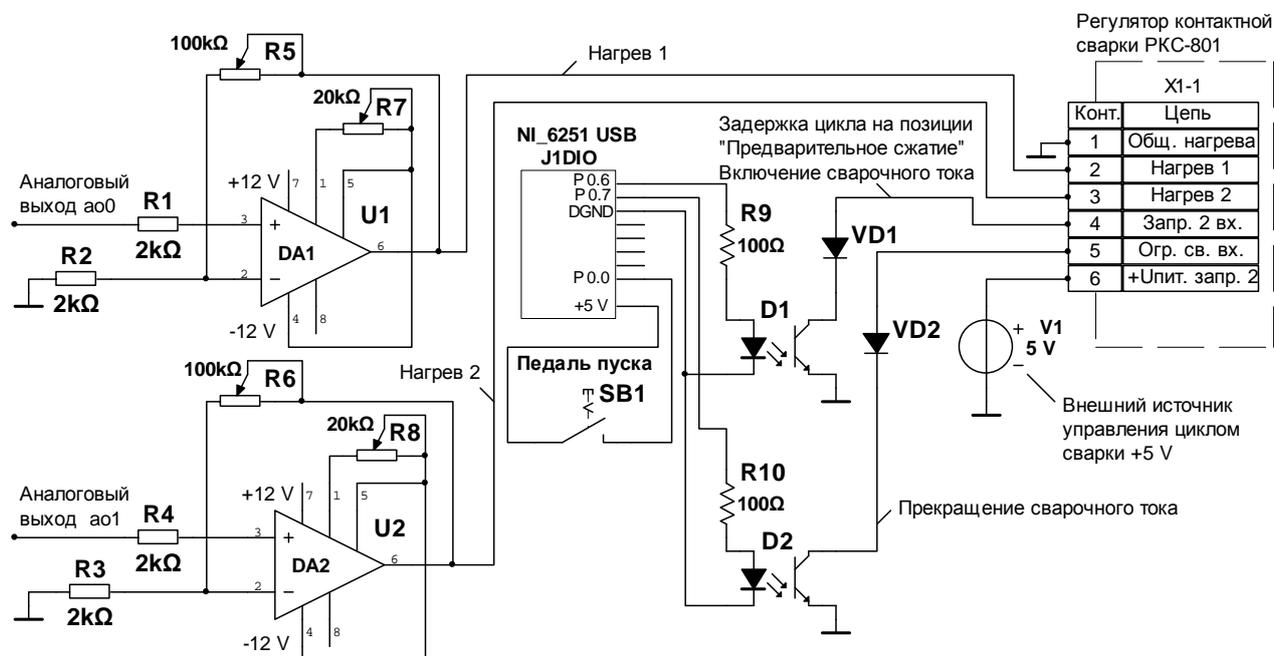
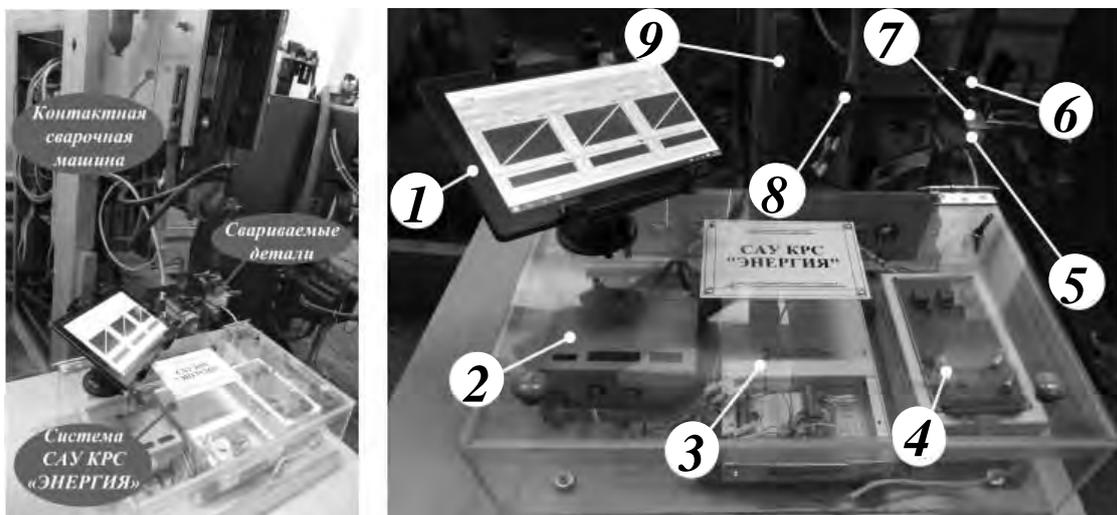


Рисунок 5.1 – Принципиальная электрическая схема устройства согласования преобразователя напряжений NI-USB 6251 и регулятора контактной сварки РКС-801

Аппаратура системы активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону представлена на рисунке 5.2. Для визуализации параметров режима сварки в составе экспериментальной установки используется регистратор сварочных процессов РКДП 0401, позволяющий с высокой точностью записывать и визуализировать различные сигналы процессов контактной сварки [183–185].

Основой данной системы активного контроля энергии является блок-диаграмма имитации процесса регулирования параметров режима сварки в программной среде LabVIEW в связке с устройством согласования сигналов (см. рисунок 5.1). Блок-диаграмма регулирования параметров режима непосредственно в ходе сварки после регистрации платой сбора данных NI-USB быстротечных сигналов сварочного напряжения и тока дает возможность рассчитывать фактические значения вводимой в межэлектродную зону электрической энергии и сравнивать их с заданными расчетными значениями, а затем вырабатывать управляющие импульсы напряжения, которые посредством устройства согласования способны корректировать начальные настройки регулятора цикла сварки, а именно ступенчато задавать

амплитуду импульсов сварочного тока и регулировать длительность их протекания в режиме реального времени путем воздействия на тиристорный контактор сварочной машины.



1 – ЭВМ с программным комплексом LabVIEW; 2 – источник питания датчика тока; 3 – преобразователь напряжений NI-USB 6251; 4 – устройство согласования; 5 – датчик тока ДТПХ-32000; 6 – электроды для рельефной сварки с зажимами датчика напряжения; 7 – свариваемые детали; 8 – кабель управления; 9 – машина контактной сварки МТ-3201

Рисунок 5.2 – Аппаратура системы активного контроля энергии тепловложения при контактной сварке

Для реализации системы активного контроля энергии в программной среде LabView была разработана имитационная модель (графический программный код), позволяющая на базе устройства сбора данных NI-USB обрабатывать и анализировать необходимые сигналы процесса сварки, а также вырабатывать сигналы внешнего управления регулятором контактной сварки [184, 186].

Графический программный код состоит из шести кадров, в каждом из которых располагается свой цикл последовательной работы системы.

Вначале создается кадровая последовательность, необходимая для задания циклов приема, обработки или генерации сигналов в системе в строгом порядке друг за другом. Для этого на рабочем поле *"Block Diagram"* правой клавишей мыши вызываем меню *"Functions"/"Express"/"Execution Control"/"Flat Sequence Structure"* и перетаскиваем появившийся виртуальный инструмент левой клавишей мыши на рабочее поле. Нажимаем правой клавишей мыши на границу блока кадровой последовательности для вызова контекстного меню, после чего выбираем *"Add Frame After"* левой клавишей мыши. Повторяем данную операцию до тех пор, пока не получим шесть последовательных кадров, в каждом из которых в дальнейшем будет располагаться свой цикл работы системы.

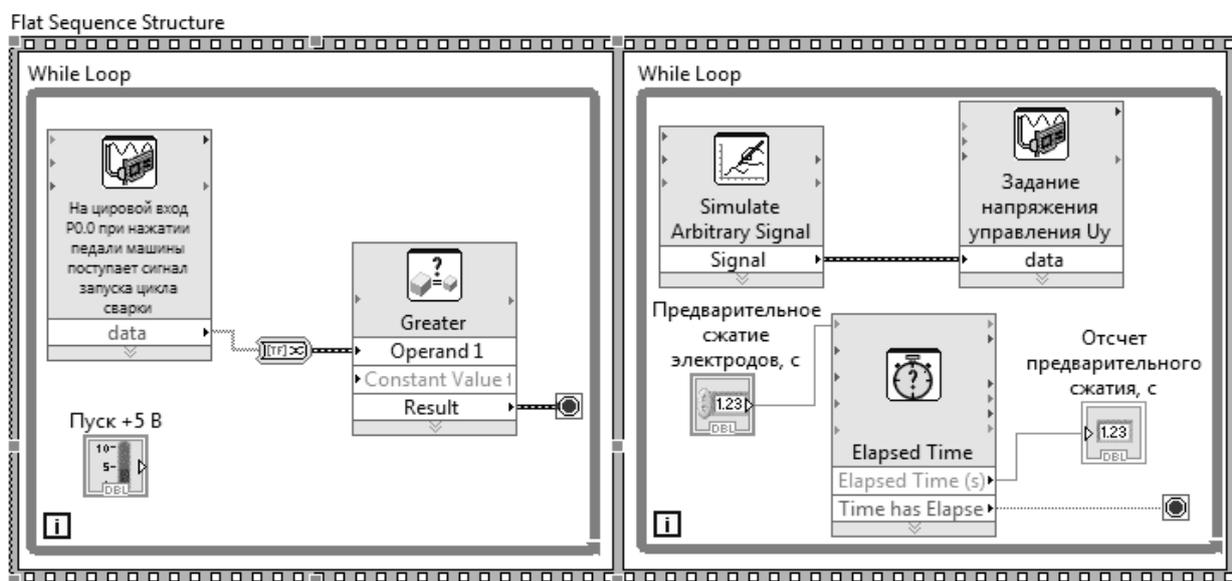
Формирование последовательных кадров программы описано далее.

1 На рабочем поле правой клавишей мыши вызываем меню *"Functions"/"Express"/"Input"*. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскиваем левой клавишей мыши в первый кадр прибор *"DAQ Assistant Input"*. В его меню *"Create New Express Task"* нажимаем *"Acquire Signals"/"Digital Input"/"Line Input"/"Port0/Line0"/"Finish"*. Появляется меню прибора *"DAQ Assistant Input"*, в котором в опции *"Acquisition Mode"* выбираем опцию *"1 Sample (On Demand)"* и нажимаем *"OK"*. В результате конфигурируется виртуальный блок *"DAQ Assistant Input"* для приема одного цифрового сигнала за один цикл измерения (рисунок 5.3, а).

Далее вызываем меню *"Express"/"Arithmetic & Comparison"/"Comparison"* и левой клавишей мыши перетаскиваем блок *"Comparison"* в первый кадр последовательности, после чего в появившемся на экране меню настраиваем условие *">Greater Value 1"* и нажимаем *"OK"*. В результате создается блок сравнения, основная функция которого – распознавание логического цифрового сигнала напряжения величиной 5 В. Соединяем между собой выход *"Data"* виртуального прибора *"DAQ Assistant Input"* со входом *"Operand 1"* прибора *"Comparison"*.

а)

б)



а – первый кадр «Нажатие педали и запуск циклограммы сварки»; б – второй кадр «Задание напряжения управления»

Рисунок 5.3 – Формирование последовательных кадров программы

В меню правой клавишей мыши нажимаем *"Express"/"Execution Control"/"While Loop"* и обводим область, в которой находятся приборы *"DAQ Assistant*

Input и *Comparison*. Соединяем выход *Result* прибора *Comparison* с красным индикатором *Stop*.

В результате создаем **первый кадр** последовательности. Он работает следующим образом: при нажатии кнопки *Run* программа ожидает нажатия сварщиком педали контактной машины и поступления на цифровой вход P0.0 платы NI-USB цифрового сигнала величиной 5 В, после чего начинается следующий цикл.

Для альтернативного запуска системы в режиме симуляции создаем подвижный регулятор *Fill Slide*, для этого на лицевой панели *Front Panel* вызываем *Controls/Express/Numeric Controls/Fill Slide* и подписываем элемент *Fill Slide* «Пуск +5 В». При запуске в режиме симуляции соединяем появившийся на панели *Block Diagram* символ со входом *Operand 1* прибора *Comparison* (см. рисунок 5.3, а).

2 Во **втором кадре** последовательности формируется сигнал напряжения управления U_y , задающий величину сварочного тока позиции «Нагрев 1» регулятора (см. рисунок 5.1), и выводится на аналоговый выход 1 платы NI-USB. Для генерации аналогового сигнала управления необходимо выбрать меню *Functions/Express/Output*. В появившемся окне виртуальных приборов перетаскиваем левой клавишей мыши на рабочее поле прибор *DAQ Assistant*. В его меню *Create New Express Task* нажимаем *Generate Signals/Analog Output/Voltage/ao0/Finish*. В результате настраивается первый аналоговый выход *ao0* устройства NI-USB. В опции *Generation Mode* выбираем опцию *N Samples* и нажимаем *OK*. В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок *DAQ Assistant Output* для генерации аналогового сигнала напряжения управления U_y (рисунок 5.3, б).

Аналоговый сигнал управления U_y формируется с помощью блока *Simulate Arbitrary Signal*. После инициализации данного блока появляется его меню, в котором по координатам времени задается уровень напряжения U_y в пределах 0...10 В, соответствующий требуемой величине сварочного тока I_2 . Затем соединяем выход *Signal* виртуального прибора *Simulate Arbitrary Signal* со входом *Data* прибора *DAQ Assistant Output*.

В меню правой клавишей мыши нажимаем *Express/Execution Control/While Loop* и обводим мышью область, в которой находятся приборы *DAQ Assistant Output* и *Simulate Arbitrary Signal*. В результате создается круговой цикл. Далее из меню *Express/Execution Control* перетаскиваем на рабочее поле блок *Elapsed Time* и после его инициализации задаем в опции *Time Target* задержку до начала следующего цикла, равную длительности предварительного сжатия электродов согласно циклограмме процесса сварки, а выход *Time has Elapsed* соединяем с красным индикатором *Stop*.



В результате создаем **второй кадр** последовательности, задающий напряжение управления U_y и, соответственно, величину сварочного тока позиции «Нагрев 1» регулятора (см. рисунок 5.3, б).

3 Для создания **третьего кадра**, который должен управлять включением сварочного тока после отсчета предварительного сжатия, необходимо сформировать виртуальный прибор генерации двух цифровых сигналов на цифровых выходах платы NI-USB, отвечающих соответственно за включение и выключение сварочного тока (см. рисунок 5.1). Для этого на рабочем поле в меню правой клавишей мыши выбираем меню *"Functions"/"Express"/"Output"* и перетаскиваем на рабочее поле прибор *"DAQ Assistant"*. В его меню *"Create New Express Task"* нажимаем *"Generate Signals"/"Digital Output"/"Line Output"/"Port0/Line 6, Port0/ Line 7"/ "Finish"*. В опции *"Generation Mode"* выбираем опцию *"1 Sample (On Demand)"* и нажимаем *"OK"*. В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок *"DAQ Assistant Output"* и настраиваются два цифровых выхода устройства NI USB (рисунок 5.4).

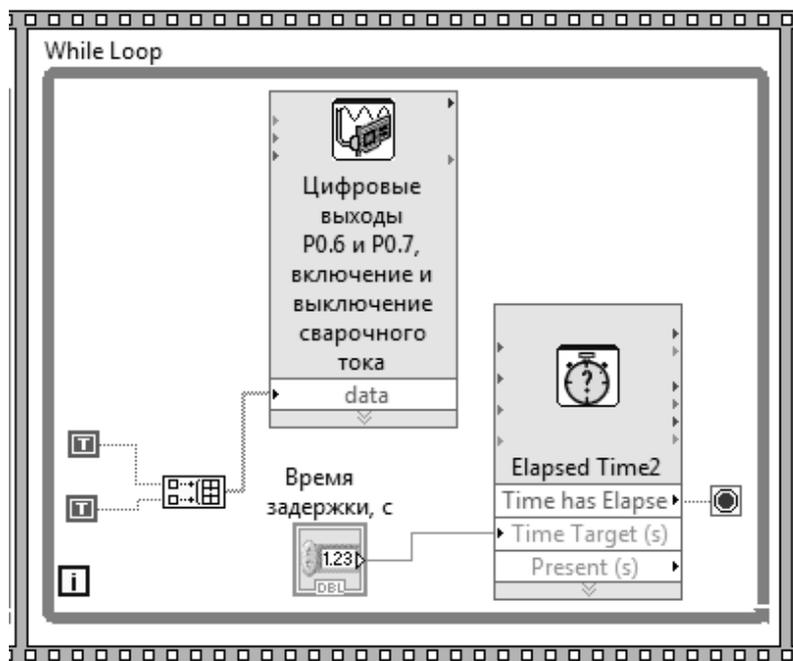


Рисунок 5.4 – Третий кадр «Включение сварочного тока»

В меню правой клавишей мыши нажимаем *"Programming"/"Array"* и перетаскиваем блок *"Build array"* на рабочее поле. Затем нажимаем *"Express"/"Arithmetic/Comparison"/ "Boolean"* и перетаскиваем на это же поле два блока *"True Constant"*. Соединяем выходы блоков *"True Constant"* со входами блока *"Build array"*, а вывод блока *"Build array"* – со входом виртуального прибора *"DAQ Assistant Output"*. В результате создаем вариативную область для логических условий. Подача сигналов высокого уровня *"True"* на цифровые выходы P0.6 и P0.7 платы NI-USB приводит к включению сварочного тока,

который будет протекать до тех пор, пока на цифровом выходе P0.7 не появится сигнал низкого уровня "False".

В меню правой клавишей мыши нажимаем "Express"/"Execution Control"/"While Loop" и обводим мышью область, в которой находятся приборы "DAQ Assistant Output" и "Build array". В результате создается круговой цикл. Далее нажимаем в меню правой клавишей мыши "Express"/"Execution Control" и перетаскиваем на рабочее поле блок "Elapsed Time" и после его инициализации задаем в опции "Time Target" задержку до начала следующего цикла, равную 1 мс, а выход "Time has Elapsed" соединяем с красным индикатором "Stop". В результате создаем **третий кадр** последовательности системы (см. рисунок 5.4).

4 Для создания **четвертого кадра**, который должен регистрировать и обрабатывать мгновенные сигналы сварочного тока i_2 и напряжения $u_{ЭЭ}$, а также сравнивать фактические значения выделившейся в межэлектродной зоне энергии с требуемыми, необходимо сформировать виртуальный прибор регистрации двух сигналов, поступающих на аналоговые входы платы NI-USB. Для этого используем виртуальный прибор "DAQ Assistant Input". В его меню "Create New Express Task" нажимаем "Acquire Signals"/"Analog Input"/"Voltage"/"ai0, ai1"/"Finish". В результате настраиваются два аналоговых входа ($ai0$ и $ai1$) устройства NI USB (см. рисунок 5.1). В меню прибора "Acquisition Mode" выбираем "Continuous Samples" – непрерывную выборку с частотой "Rate (Hz)" – 1000 Hz и количеством выборок "Samples to Read" – 10 и нажимаем "OK". В результате на рабочем поле конфигурируется виртуальный блок "DAQ Assistant Input" для приема двух аналоговых сигналов с датчиков сварочного тока i_2 и напряжения межэлектродной зоны $u_{ЭЭ}$ (каналы $ai0$, $ai1$) в непрерывном режиме (рисунок 5.5).

Мгновенные сигналы датчиков тока i_2 и напряжения $u_{ЭЭ}$ необходимо преобразовать в действующие I_2 и $U_{ЭЭ}$. Для этого используем блок "Average DC/RMS" из меню "Functions"/"Signal Processing"/"Waveform Measurements". Для задания интервала расчета к выводу "averaging time" подключаем блок "1/x", который находится в меню "Functions"/"Mathematics"/"Numeric". При задании входной константы блока "1/x", равной 100, определяем период усреднения $averaging\ time = 0,01$ с – интервал времени, для которого получают один результат измерения.

Для тарировки сигнал датчика тока умножаем на 5000 и получаем значение действующего тока I_2 в килоамперах. Делением действующих значений напряжения и тока получаем сопротивление межэлектродной зоны в омах, умножением на 10^6 переводим в микроомы.



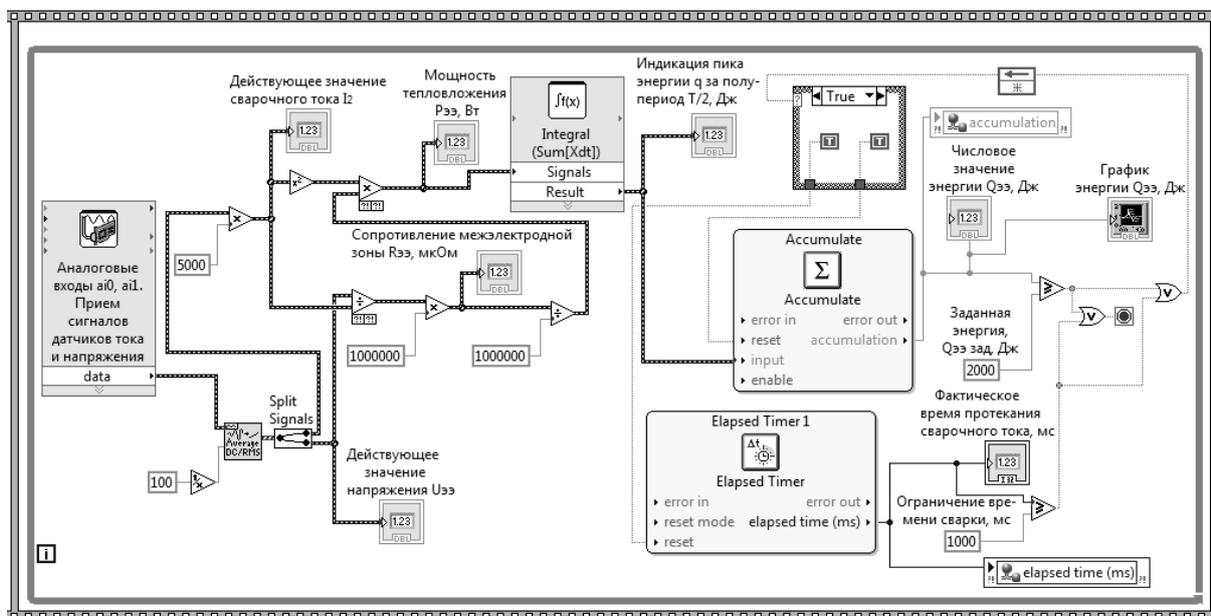


Рисунок 5.5 – Четвертый кадр «Расчет энергии тепловложения»

В блок-диаграмму включаем оператор возведения сигнала тока в квадрат "X²" и оператор умножения "×", который перемножает квадратичный сигнал тока на сопротивление, в результате чего рассчитываем мощность тепловложения в зону сварки $P_{ЭЭ} = I_{СВ}^2 R_{ЭЭ}$ за полупериод тока. Сигнал сопротивления при этом делим на 10^6 , чтобы перевести в омы, а мощность получить в ваттах (см. рисунок 5.5).

В диаграмму добавляем оператор интегрирования "Time Domain", в открывшемся меню которого "Configure Time Domain Math" выбираем математическую операцию "INTEGRAL (Sum[Xdt])", а в разделе "Calculation Mode" (режим расчета) – "Per segment calculation" (расчет по сегментам).

Для того чтобы цикл просчитывал полную выделившуюся в зоне сварки энергию за конкретное время и останавливал процесс сварки с высокой точностью, необходимо добавить в алгоритм расчета блоки, которые относятся к категории "Real Time".

Чтобы приступить к работе в режиме жесткого реального времени, требуется дополнительно установить модуль LabVIEW Real-Time, который с помощью операционной системы реального времени (далее – ОСРВ) позволяет создавать детерминированные приложения реального времени. Отклик реального времени – это надежный, без сбоев отклик на определенное событие. Операционные системы общего назначения не могут гарантировать определенное время отклика, и вычисления могут занять как значительно большее, так и меньшее время по сравнению с ожидаемым [187].

Детерминированные системы предсказуемо откликаются на события в отведенный ограниченный временной интервал. Это важно в приложениях, где применяются регуляторы и автоматизированное управление. В таких прило-

жениях управляющая программа измеряет входные сигналы, производит вычисления, в которых используются значения измеренных входных сигналов, и на основе вычислений устанавливает значения выходных сигналов. Приложения, которые требуют применения ОСРВ, являются критическими по времени, например, приложения по управлению быстротечными процессами контактной сварки.

Для того чтобы обеспечить детерминизм, критическая по времени задача выгружается из Windows и передается на целевую RT-систему. Поэтому требуются две системы. Первая система с ОС Windows называется «хост» (host). На хост-системе происходит разработка приложения. Разработанное приложение загружается на процессор второй системы, которая называется целевой RT-системой и имеет ОСРВ.

National Instruments производит несколько вариантов целевых RT-платформ реального времени:

- одноплатные встраиваемые устройства серии Real-Time;
- контроллеры Real-Time PXI;
- контроллеры Real-Time Compact FieldPoint;
- контроллеры Real-Time Compact Vision;
- контроллеры CompactRIO.

Таким образом, для расчета суммарной энергии тепловложения необходимо добавить в алгоритм расчета блок аккумуляции значений энергии, который относится к категории "*Real Time*". Для этого требуется создать проект и добавить в него всю кадровую последовательность.

Для создания проекта в меню LabVIEW нажимаем "*File*" / "*New Project*" / "*Add*". Далее сохраняем файл кадровой последовательности, выходим из LabVIEW и перезапускаем созданный проект. Затем в проекте открываем файл кадровой последовательности и только тогда в него можно добавить любой из модулей категории "*Real Time*".

В меню правой клавишей мыши нажимаем "*Real Time*" / "*Function Blocks*" / "*Accumulate-Collecte*" и перетаскиваем мышью блок "*Accumulate*" на рабочее поле.

Затем соединяем выход "*Result*" блока "*INTEGRAL (Sum[Xdt])*" со входом "*Input*" блока "*Accumulate*". Выход "*Accumulation*" блока "*Accumulate*" соединяем с оператором сравнения для выполнения условия достижения энергией, выделяемой в зоне сварки $Q_{ЭЭ}$, требуемого значения $Q_{ЭЭ}$ зад. Выход оператора сравнения соединяем с первым входом логического оператора "*ИЛИ*" ("*Express*" / "*Arithmetic/Comparison*" / "*Boolean*" / "*Or*").

В случае ошибочного задания очень большого количества энергии процесс сварки может затянуться и превысить критическое время, что приведет к прожогам и повреждению электродов. Для задания фиксированного времени экстренного завершения цикла и всей программы вводим таймер категории



"Real Time". Для этого в меню правой клавишей мыши нажимаем "Real Time"/"Function Blocks"/"Timer" и перетаскиваем мышью блок "Elapsed Timer" на рабочее поле. На выходе таймера создаем числовой индикатор времени, оператор сравнения с числом, например, 1000 мс, и выход оператора сравнения соединяем со вторым входом логического оператора "ИЛИ". Выход логического оператора "ИЛИ" соединяем с красным индикатором "Stop".

Для создания **четвертого цикла** нажимаем "Express"/ "Execution Control"/ "While Loop" и обводим область, в которой находятся все элементы кадра (см. рисунок 5.5).

При завершении цикла происходит сброс таймера "Elapsed Timer" и блока "Accumulate" подачей сигналов высокого уровня на их входы "Reset". Сигнал сброса поступает с выхода логического элемента "Or" на вход блока "Case Structure" из меню "Programming"/ "Structures". Блок "Case Structure" формирует сигналы высокого уровня при входном сигнале "True" и сигналы низкого уровня при входном сигнале "False".

5 Пятый кадр (рисунок 5.6, а) создается по аналогии с третьим (см. рисунок 5.4), но здесь при подаче сигнала низкого уровня "False" на цифровой выход P0.7 выключается сварочный ток. Одновременно начинается отсчет времени проковки таймером "Elapsed Time3".

6 Шестой кадр (рисунок 5.6, б) аналогичен пятому, он сбрасывает цифровые выходы P0.6 и P0.7 платы NI-USB в исходное нулевое состояние "False", отключаются реле K1 и K2 Одновременно начинается отсчет времени задержки до завершения цикла таймером "Elapsed Time4".

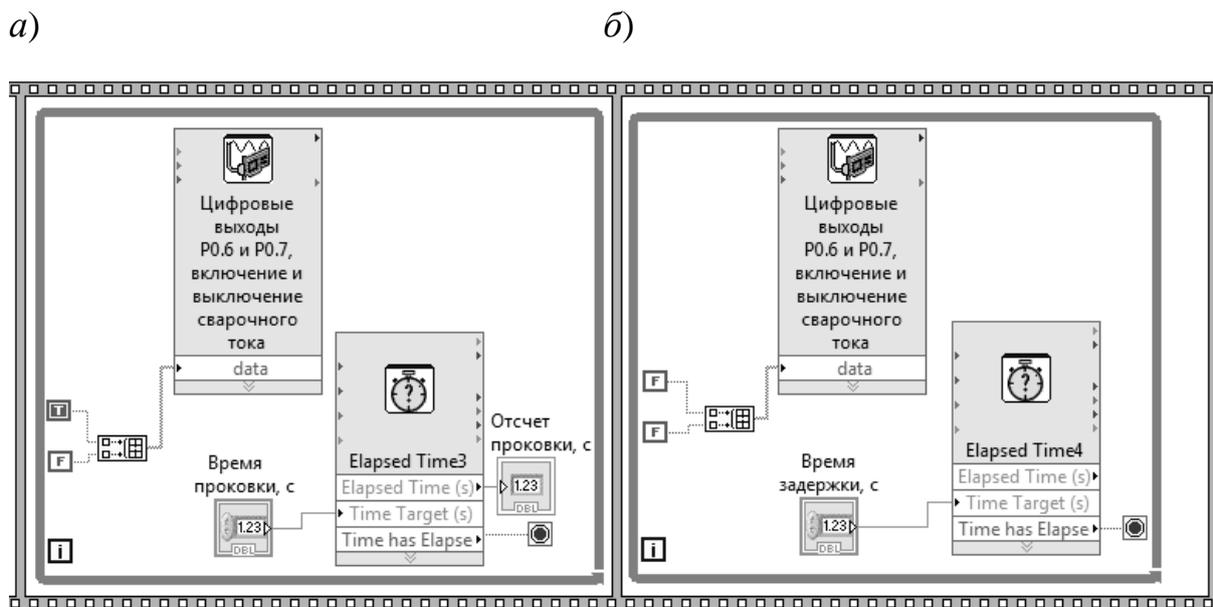


Рисунок 5.6 – Пятый кадр «Выключение сварочного тока и проковка» (а) и шестой кадр «Сброс цифровых выходов в исходное состояние» (б)

При запуске программы активного контроля энергии тепловложения в зону контактной сварки на экране отображаются рассчитанные параметры режима сварки и график аккумуляции энергии, а также определяется фактическое время протекания сварочного тока (миллисекунды) при изменении величин сварочного тока и напряжения межэлектродной зоны.

5.2 Кинетика упругопластического деформирования металла межэлектродной зоны при рельефной сварке многослойных соединений

Главной проблемой при рельефной сварке многослойных соединений является резкое снижение стабильности протекания процесса сварки с увеличением количества деталей [4, 27, 188]. Наличие двух и более контактов деталь–деталь и дополнительные собственные сопротивления деталей обуславливают завышенное в 2...3 раза начальное холодное сопротивление участка электрод–электрод $r_{\text{ЭЭ}}$. Зависимости сопротивления $r_{\text{ЭЭ}} = f(u_{\text{ЭЭ}})$ ($u_{\text{ЭЭ}}$ – напряжение межэлектродного промежутка) и $r_{\text{ЭЭ}} = f(\tau)$ (τ – время протекания сварочного тока) значительно отличаются от зависимостей, установленных для рельефной и точечной сварки двух деталей [47, 52].

Определяющее влияние на ход формирования многослойного рельефного соединения, в отличие от соединения из двух деталей, оказывают следующие главные факторы:

- наличие рельефов на нескольких деталях;
- увеличенное начальное сопротивление холодных контактов собранного пакета из трех и более деталей;
- формирование двух и более литых зон последовательно или параллельно за один сварочный цикл;
- увеличенное перемещение верхнего подвижного электрода контактной машины, зависящее от суммарной высоты рельефов.

Теоретические исследования рельефных многослойных соединений проводились на примере нахлесточного соединения трех пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 + 2 мм с выштампованными рельефами на наружных пластинах. Геометрические характеристики рельефов подбирались согласно известным рекомендациям для соответствующей толщины листа (рисунок 5.7) [27].

Сначала для сварки данного типа соединений были рассчитаны требуемые значения длительности протекания сварочного тока $\tau_{\text{СВ}}$. Дальнейший расчет уравнения теплового баланса, включающий определение полной энергии тепловложения в зону сварки $Q_{\text{ЭЭ}}$ и ее составляющих (полезной энергии $Q_{\text{Пол}}$, затрачиваемой на нагрев и плавление центрального столбика металла, и энергии тепловых потерь $Q_{\text{Пот}}$, затрачиваемой на нагрев стали в околошовной зоне и теплоотвод в электроды), производился согласно схемам и



формулам традиционных методик расчета для КТС [1, 4], адаптированным для случая КРС многослойных соединений [48, 49, 52]. Также экспериментально было определено оптимальное усилие сжатия электродов $F_{СВ}$, от которого зависит количество полной энергии, вложенной в зону сварки при расчетной длительности протекания тока $\tau_{СВ}$.

Таким образом, были определены параметры режима сварки, необходимые для дальнейших расчетов: $\tau_{СВ} = 0,4$ с; $Q_{ЭЭ} = 9034$ Дж (для одной пары рельефов); $F_{СВ} = 5,5$ кН; диаметр рельефа $d_P = 4,75$ мм; высота рельефа $h_P = 1$ мм; $r_{ЭЭ} = 80$ мкОм; $I_{СВ} = 16,8$ кА [52].

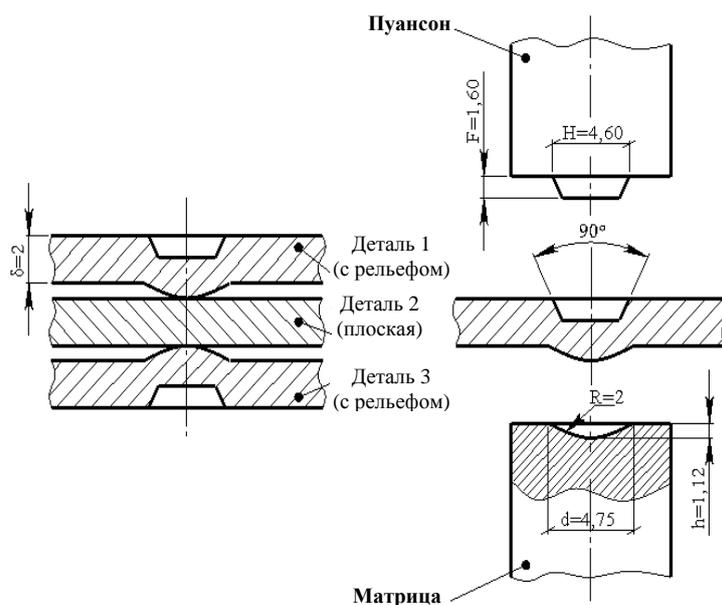


Рисунок 5.7 – Геометрические характеристики выштампованных рельефов для толщины листа 2 мм

Исследование кинетики формирования многослойного рельефного соединения производилось с помощью программы MSC.Marc. Математическая модель термомодеформационного цикла сварки учитывает особенности нагрева при прохождении электрического тока, характер упругопластического деформирования, зависимости теплофизических и механических свойств материалов от температуры, скрытую теплоту плавления. Модель использует конечно-элементный пошагово-совмещенный анализ электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также с возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа [76–83]. На рисунке 5.8 показано разбиение осесимметричной модели электрод–детали–электрод на конечные элементы для соединения трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм с одной парой выштампованных сферических рельефов [47, 52].

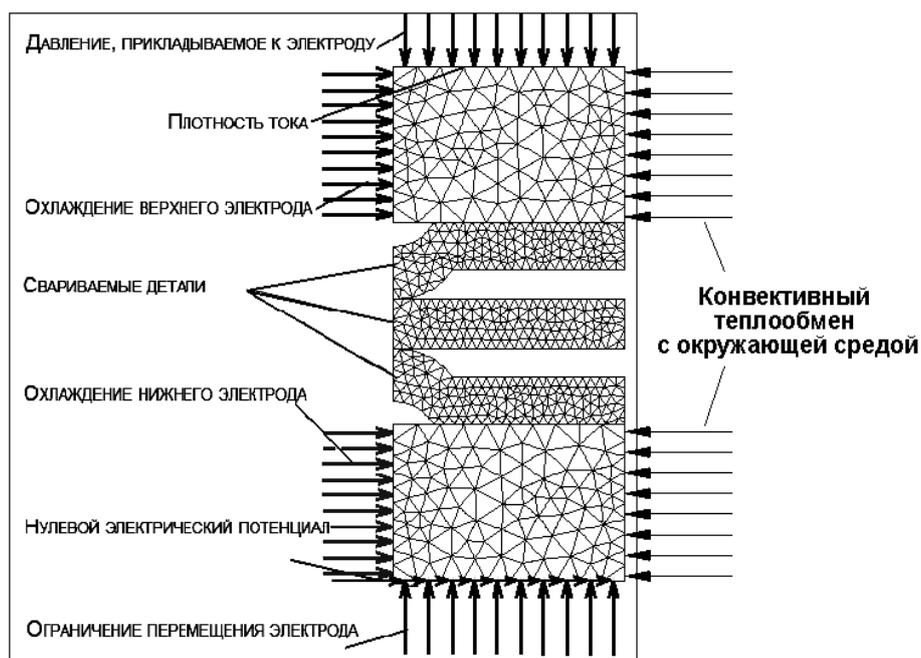
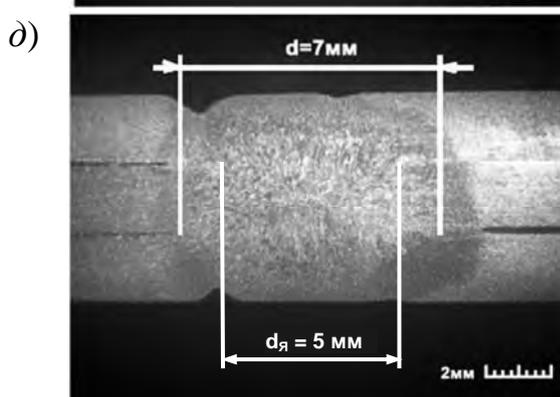
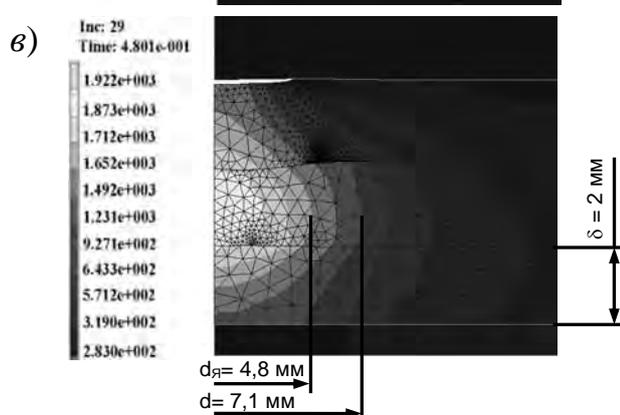
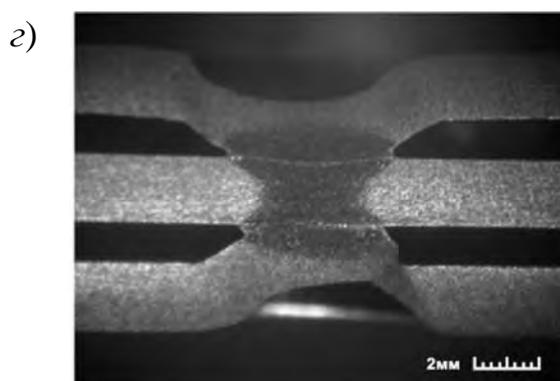
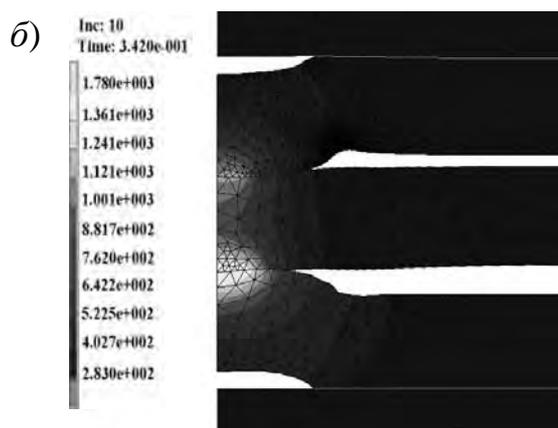
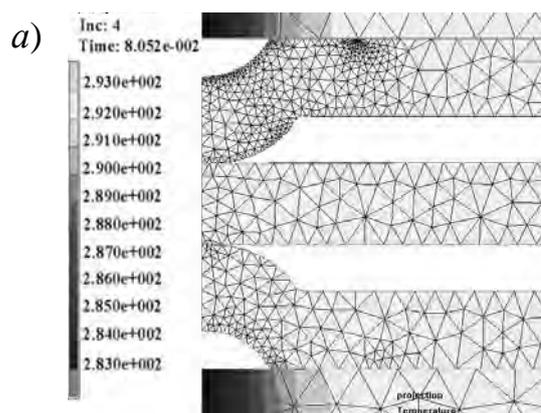


Рисунок 5.8 – Разбиение осесимметричной модели многослойного соединения пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм на конечные элементы

Целью математического моделирования термомодеформационных процессов при рельефной сварке являлось определение основных этапов кинетики формирования многослойного соединения и выявление оптимального характера тепловложения в межэлектродную зону. Вместе с тем необходим учет совместного действия электрических и тепловых полей, напряжений и деформаций от воздействия механической нагрузки. Это требует учета динамического изменения геометрии и граничных условий модели, а также нелинейности электротеплофизических и механических свойств свариваемых металлов и материала электродов. Поэтому при моделировании осуществлялась модификация сетки конечных элементов, составляющих рельефы, с учетом изменения и обновления граничных условий. Если при деформации конечного элемента угол между его гранями изменялся на величину $\Delta \geq 40^\circ$, автоматически происходила процедура переразбиения сетки конечных элементов.

В результате моделирования процессов КРС многослойного соединения были получены картины термомодеформационного цикла (рисунок 5.9), а также кривые перемещения и скорости перемещения подвижного электрода (рисунок 5.10), на базе которых были определены основные этапы кинетики формирования рельефных многослойных соединений [47, 51].

Сварка многослойного соединения начинается с предварительного сжатия деталей для создания между ними механического контакта, который устанавливается по вершинам рельефов (см. рисунок 5.9, а).



a – при предварительном сжатии деталей $\tau_{сж} = 0,08$ с; *б* – во время протекания сварочного тока $\tau_{св} = 0,26$ с; *в* – в момент выключения сварочного тока $\tau_{св} = 0,4$ с; *з* – макрошлиф соединения при $\tau_{св} = 0,26$ с; *д* – макрошлиф соединения при $\tau_{св} = 0,4$ с

Рисунок 5.9 – Распределение температурных полей и деформаций при формировании многослойных соединений (температура в кельвинах)

После включения тока происходит интенсивное смятие рельефов, вызванное нагревом металла выше температуры разупрочнения (670 K), площадь контакта между деталями возрастает и $r_{эз}$ начинает уменьшаться. Соединение между деталями при сварке начинает формироваться еще на начальной стадии осадки рельефов [4, 27]. Уже через несколько периодов сварки наблюдаются области начального схватывания поверхностей в твердой фазе. До окончания

смятия рельефов без расплавления металла соединение уже будет обладать значительной прочностью.

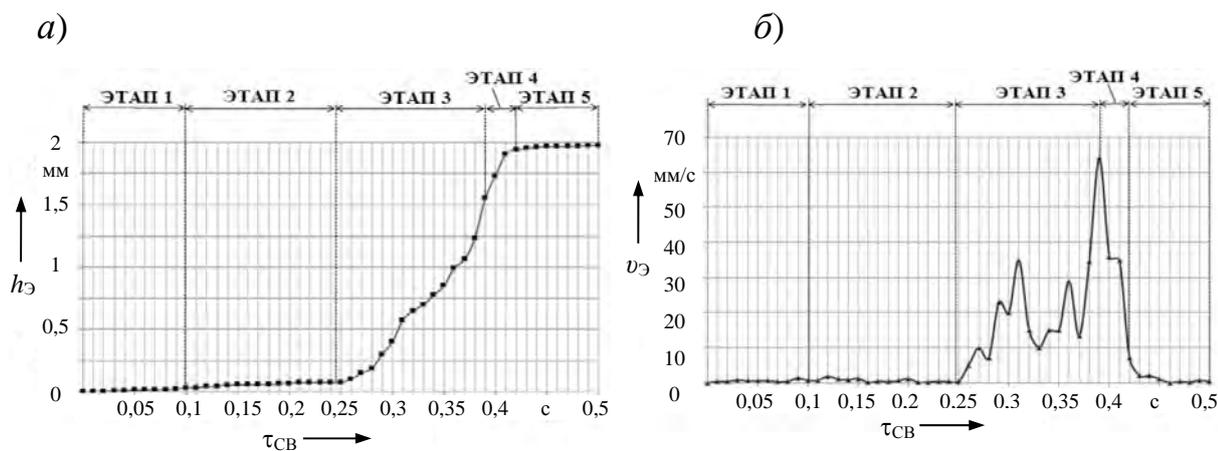


Рисунок 5.10 – Кривые перемещения (а) и скорости перемещения (б) подвижного электрода при рельефной сварке пакета из трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм

В последних периодах импульса тока в центрах контактов рельефов с пластиной начнут формироваться и расти две зоны расплавления (см. рисунок 5.9, б). По мере роста будет происходить их объединение (см. рисунок 5.9, в).

После выключения сварочного тока произойдет кристаллизация расплавленного металла зоны и образование литого ядра, форма которого в горизонтальном сечении круглая, а в вертикальном – овальная.

Для подтверждения адекватности модели осуществляли процесс рельефной сварки аналогичных соединений на сварочной машине. После сварки изготовлялись макрошлифы соединений при 10-кратном увеличении на микроскопе НЕОРНОТ-21 (см. рисунок 5.9, з, д). На макрошлифах диаметр литого ядра составил приблизительно $d_{я} = 5$ мм, диаметр зоны рекристаллизации $d = 7$ мм, те же величины при математическом моделировании соответственно составили $d_{я} = 4,8$ мм, $d = 7,1$ мм.

В результате моделирования при анализе кривых перемещения и скорости перемещения подвижного электрода были определены пять этапов кинетики формирования многослойных соединений [47, 52].

На первом этапе общая деформация рельефов перед пропуском сварочного тока при приложении предварительного усилия сжатия к электродам определяется перемещением верхнего подвижного электрода и составляет 0,02...0,05 мм, что обеспечивает стабилизацию холодного электрического сопротивления контактов межэлектродной зоны и является условием для получения качественных соединений (см. рисунок 5.10, а).

На втором этапе после включения сварочного тока наблюдается перемещение подвижного электрода на величину 0,08...0,1 мм, что состав-

ляет 4...5 % от начальной суммарной высоты рельефов $h_{\text{рз}} = 2$ мм. Металл зоны сварного соединения нагревается до температуры $T > 800$ К, что сопровождается ростом контактных площадок и активацией контактных поверхностей. Это является обязательным условием получения прочных сварных соединений в твердой фазе [80, 81].

На третьем этапе появление зон расплавления приводит к интенсивной пластической деформации металла рельефа (см. рисунок 5.9, б). Начало этапа можно условно определить на основании полученных кривых перемещения и средней скорости перемещения подвижного электрода в процессе сварки. К концу этапа величина перемещения электрода достигает 1,2...1,6 мм, что составляет 60...80 % от начальной суммарной высоты рельефов (см. рисунок 5.10, а), а скорость его перемещения, импульсивно нарастая, достигает максимального значения до 65 мм/с (см. рисунок 5.10, б). Процесс смятия рельефов сопровождается интенсивным увеличением размеров контактных площадок.

На четвертом этапе скорость перемещения подвижного электрода начинает резко снижаться от максимума на предыдущем этапе до нуля. Окончанием данного этапа является полная осадка рельефов на всю их высоту и касание поверхностей деталей. Количество вводимой в межэлектродную зону электрической энергии достигает требуемого значения. Сварочный ток можно выключать.

На заключительном пятом этапе осуществляется проковка сварного соединения, при этом протекают релаксационные процессы, уменьшающие остаточные напряжения в околошовной зоне.

По результатам анализа кинетики образования рельефного многослойного соединения было установлено, что процесс сварки в ряде случаев нецелесообразно доводить до формирования общего расплавленного ядра (рисунок 5.11). Сварочный ток можно отключить раньше, когда формируются отдельные ядра для каждой пары контактирующих деталей. Проплавление деталей при этом можно снизить до минимальной величины, достаточной для обеспечения прочности соединения, при экономии затрат электроэнергии сварочной машины.

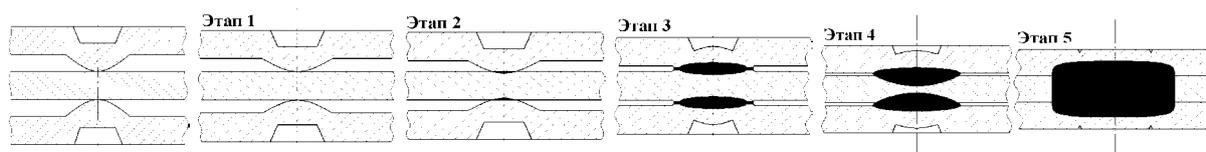


Рисунок 5.11 – Кинетика образования многослойного соединения

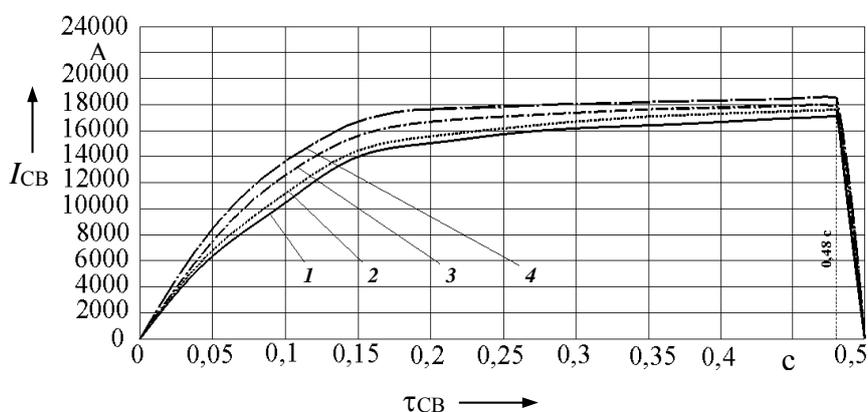
5.3 Влияние усилия сжатия электродов на энергетические показатели процесса формирования многослойных соединений

Определение степени влияния параметров режима рельефной сварки на энергетические показатели процесса формирования многослойных соединений проводилось на образцах из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм. На экспериментальной установке осуществляли сварку соединений из трех деталей с круглыми рельефами высотой $h_p = 1$ мм и диаметром $d_p = 5$ мм на верхней и нижней деталях пакета (см. рисунок 5.7).

Влияние усилия сжатия электродов F_{CB} на параметры режима сварки представлено в таблице 5.1 (рисунок 5.12) [49].

Таблица 5.1 – Влияние усилия сжатия F_{CB} на параметры режима сварки

n , шт.	τ_{CB} , с	F_{CB} , кН	$Q_{ЭЭ}$, кДж	$R_{ЭЭ}$, мкОм	I_{CB} , кА	$P_{ЭЭ}$, кВт
3	0,48	4,1	15	110	17	32
		5,1	14,5	100	17,5	30,6
		6,1	13,9	90	18	29

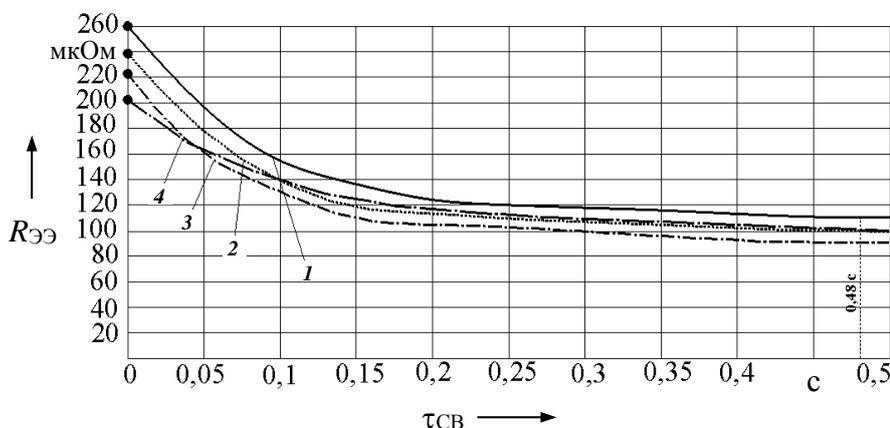


1 – $F_{CB} = 4,1$ кН; 2 – $F_{CB} = 5,1$ кН; 3 – $F_{CB} = 6,1$ кН; 4 – $F_{CB} = 7,1$ кН

Рисунок 5.12 – Форма импульса сварочного тока при изменении усилия сжатия

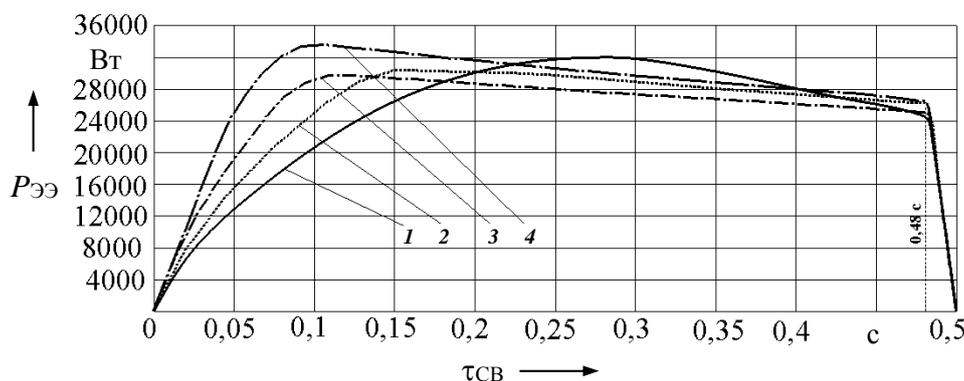
Анализ графиков показывает, что при повышении усилия сжатия электродов увеличивается скорость нарастания импульса сварочного тока (см. рисунок 5.12). Максимальное значение тока в момент его выключения также возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении усилия сжатия электродов происходит более интенсивное смятие микронеровностей на поверхностях деталей, что приводит к росту фактической площади контакта деталей и соответствующему уменьшению сопротивления межэлектродной зоны (рисунок 5.13). Изменение величины усилия сжатия электродов влечет за

собой значительные колебания мощности (рисунок 5.14) и энергии тепловложения (рисунок 5.15) в зону сварки.



1 – $F_{СВ} = 4,1$ кН; 2 – $F_{СВ} = 5,1$ кН; 3 – $F_{СВ} = 6,1$ кН; 4 – $F_{СВ} = 7,1$ кН

Рисунок 5.13 – Сопротивление межэлектродной зоны при изменении усилия сжатия электродов

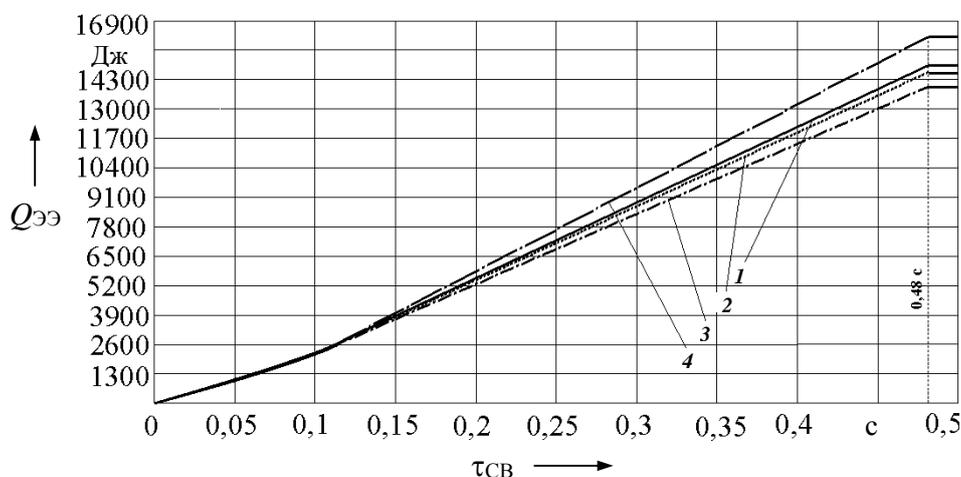


1 – $F_{СВ} = 4,1$ кН; 2 – $F_{СВ} = 5,1$ кН; 3 – $F_{СВ} = 6,1$ кН; 4 – $F_{СВ} = 7,1$ кН

Рисунок 5.14 – Мощность тепловложения в зону сварки при изменении усилия сжатия электродов

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что изменение усилия сжатия электродов при контактной рельефной сварке многослойных соединений существенно влияет на активное сопротивление межэлектродной зоны, что, в свою очередь, приводит к изменению напряжения и сварочного тока, и по этой причине отдельно каждый из параметров не может быть информативным в системе автоматического управления процессом. Параметрами, обобщающими все эти величины, являются мощность и энергия тепловложения в межэлектродную зону. Кроме величины сварочного тока, в процессе сварки необходимо иметь информацию о сопротивлении участка

электрод–электрод или падении напряжения на данном участке. Мощность и энергия тепловложения достаточно полно характеризуют протекание процесса сварки и позволяют прогнозировать качество выполняемого соединения.



1 – $F_{СВ} = 4,1$ кН; 2 – $F_{СВ} = 5,1$ кН; 3 – $F_{СВ} = 6,1$ кН; 4 – $F_{СВ} = 7,1$ кН

Рисунок 5.15 – Энергия тепловложения при изменении усилия сжатия электродов

5.4 Разработка технологического процесса рельефной сварки многослойных соединений и оснастки для его реализации

Примером применения рельефной сварки многослойных соединений могут служить дверные замки сувальдного типа, изготавливаемые на ОАО «Могилевский завод «Строммашина».

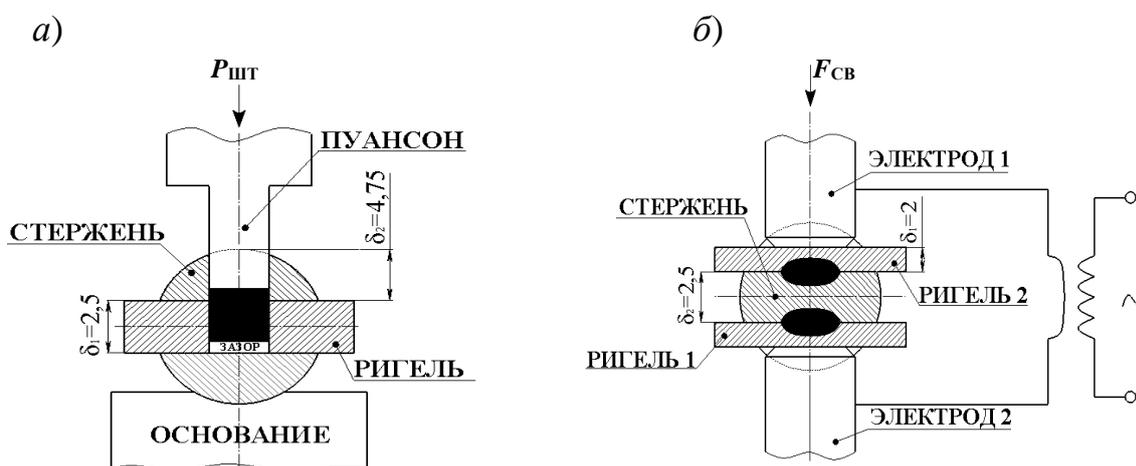
Одним из основных элементов данного изделия является засов, представляющий собой соединение ригеля (пластина определенной конструктивной формы) и двух или трех стержней, причем в разных модификациях замков используются разные варианты соединения ригелей со стержнями (рисунок 5.16). Материал ригеля – сталь 08кп. Материал стержня – сталь 35.

На предприятии ригели со стержнями соединяются между собой способом штамповки с использованием составного пуансона. Для позиционирования стержней относительно ригеля их торцы предварительно подготавливают: в ригеле в местах предполагаемого соединения со стержнями заранее выштамповываются сквозные отверстия прямоугольной формы для уменьшения требуемого усилия штамповки $P_{шт}$ при соединении ригеля со стержнями. На схеме (рисунок 5.17, а) в виде закрашенного квадрата показан смещенный при штамповке металл стержня. Проблемой при получении указанных соединений способом штамповки является низкая прочность (усилие разрушения на срез для одного стержня составляет не более 4600 Н) и точность взаимного

расположения стержней засова – в ряде случаев стержни расшатываются вручную (см. рисунок 1.20) [50].



Рисунок 5.16 – Сувальдные замки производства ОАО «Могилевский завод «Строммашина»



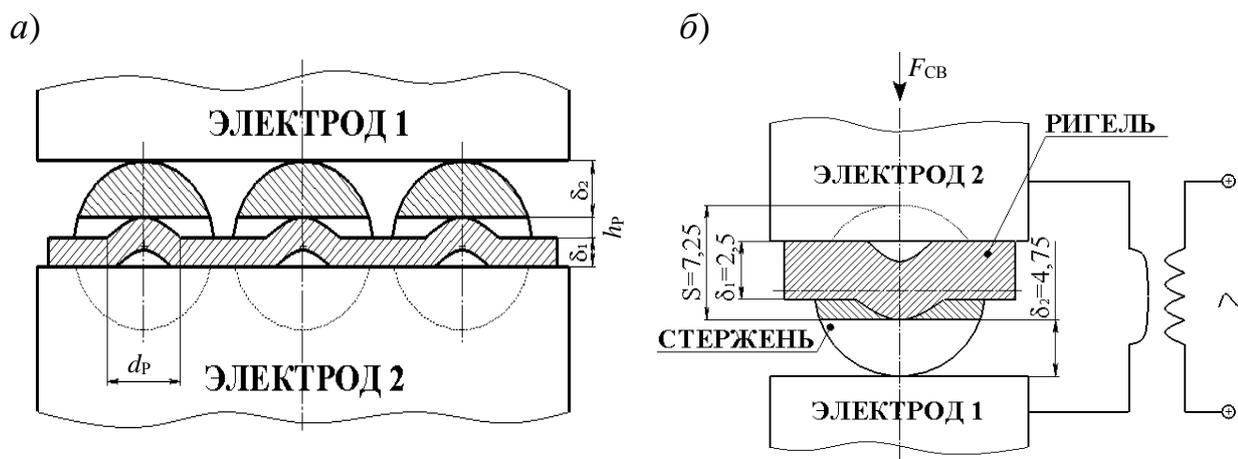
a – методом штамповки; *б* – контактной точечной сваркой

Рисунок 5.17 – Схемы изготовления засова замка сувальдного

В заводской лаборатории были предприняты попытки замены штамповки на контактную точечную сварку (рисунок 5.17, *б*). При этом столкнулись со следующими проблемами:

- сварка одного засова производится в три цикла;
- для обеспечения плоского контакта с ригелем требуется фрезеровать стержни с двух сторон, но при этом получается большая площадь контакта, что требует увеличения сварочного тока, поэтому из-за сильного нагрева происходит значительная деформация зоны соединения;
- при сборке и сварке ригеля со стержнями вручную неизбежно нарушается параллельность ригелей в засове, так как отсутствует жесткая фиксация деталей.

Для устранения заводских проблем получения неразъемного соединения засова замка был разработан технологический процесс контактной рельефной сварки. Неразъемные соединения относятся к пакетным, так как соединение четырех деталей одновременно (одного ригеля и трех стержней) будет происходить за один цикл сварки в результате параллельного протекания сварочного тока через детали с параллельным образованием трех литых зон (см. рисунок 1.16, б). При этом на ригеле предварительно выштамповываются сферические рельефы, а с края торца каждого стержня будет фрезероваться технологический уступ на определенную ширину S . Геометрия соединения перед сваркой представлена на рисунке 5.18 [50, 186].



a – геометрия деталей засова перед сваркой; b – размеры рельефа; F_{CB} – усилие сжатия; δ_1 – толщина ригеля; δ_2 – толщина стержня в месте сварки

Рисунок 5.18 – Схема соединения ригеля со стержнем при рельефной сварке

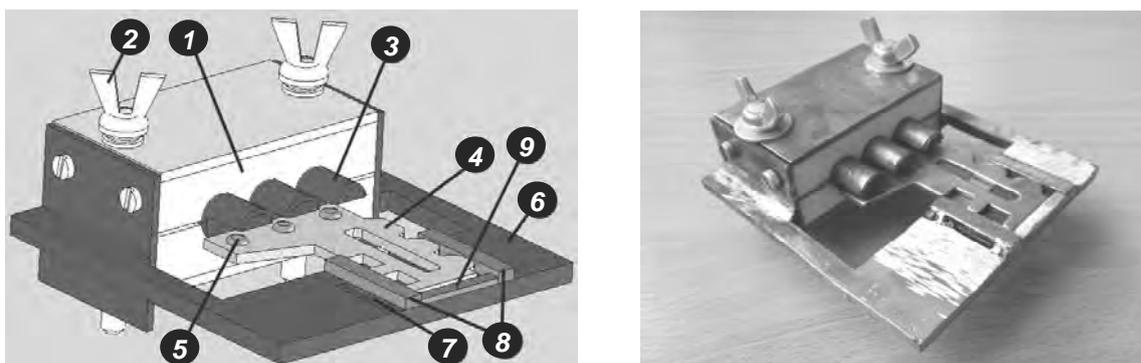
При расчете параметров режима сварки пакетного соединения засова замка необходимо было задать длительность протекания сварочного тока τ_{CB} для КРС толщиной 2,5 мм (ригель) + 4,75 мм (максимальная ширина торца стержня после фрезерования). В результате экспериментальных исследований по сварке указанных соединений, а также литературных рекомендаций [4] было задано $\tau_{CB} = 0,45$ с. Диаметр и высота рельефа для толщины ригеля 2,5 мм следующие: $d_p = 5$ мм; $h_p = 1,3$ мм [27]. Затем составлялось уравнение теплового равновесия согласно формулам традиционных методик для КТС, адаптированных для КРС [49].

Расчетная величина требуемого тепловложения в зону сварки составила $Q_{ЭЭ} = 23137$ Дж. Значение сопротивления межэлектродной зоны в момент выключения сварочного тока было установлено экспериментально: $R_{ЭЭ} = 72...95$ мкОм. Требуемый сварочный ток $I_{CB} = 25,3$ кА. С учетом экспериментальных исследований было установлено требуемое усилие сжатия

электродов при сварке $F_{\text{св}} = 7,0$ кН. Контур контактной поверхности электродов должен быть прямоугольной формы размером 66×11 мм [50].

Для получения соединений деталей засовов замков на машине контактной сварки МТ-3201 было разработано специальное приспособление (рисунок 5.19), отвечающее следующим требованиям:

- стержни должны быть параллельны между собой, отклонение от параллельности составляет не более 0,2 мм;
- точность взаимного расположения ригеля и стержней: допустимое отклонение составляет не более 0,5 мм;
- учет перемещения стержней при сварке ввиду деформирования рельефов на расстояние, равное их высоте – 1,3 мм;
- легкость взаимного позиционирования ригеля и стержней перед сваркой;
- легкость съема готового изделия из приспособления после сварки;
- высокая износостойкость элементов приспособления;
- минимальный нагрев приспособления при сварке.



1 – фторопластовый позиционер; 2 – шпилька; 3 – стержень засова; 4 – ригель засова; 5 – рельеф; 6 – основание приспособления; 7 – магнитный фиксатор; 8 – направляющие планки; 9 – упорная планка

Рисунок 5.19 – Приспособление для сборки и сварки засова

Основным элементом разработанного приспособления является фторопластовый позиционер (шаблон) 1 со шпильками 2, обеспечивающий высокую точность расположения стержней засова 3 при одновременной простоте их укладки в приспособление и съема готового изделия после сварки [50]. Фторопласт – износостойкий материал, работающий при температурах до $+250$ °С, т. е. выше возможного нагрева стержней засова при сварке. Базирование ригеля засова 4 с рельефами 5 относительно основания приспособления 6 обеспечивает магнитный фиксатор 7, встроенный с обратной стороны основания. Две направляющие планки 8 и упорная планка 9, размещенные в основании приспособления, гарантируют высокую точность расположения

ригеля относительно стержней в процессе сварки. Для того чтобы основание приспособления б не нагревалось в процессе сварки под воздействием сильных магнитных полей, его необходимо изготавливать из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Далее была осуществлена сварка засовов на расчетных режимах с применением регулятора цикла сварки, обеспечивающего крутонарастающий импульс сварочного тока, после чего были проведены прочностные испытания соединений на срез (таблица 5.2). Среднее значение выдержанной нагрузки на один стержень составило $P_{\text{ср}} = 10,24$ кН. При этом все образцы разрушались по литой зоне, средний диаметр которой $d_{\text{лз}} = 6,94$ мм (рисунок 5.20) [50, 189].

Таблица 5.2 – Параметры прочностных испытаний засовов, полученных при сварке на расчетных режимах

$F_{\text{св}}$, кН	$\tau_{\text{св}}$, с	$I_{\text{св}}$, кА	$Q_{\text{ээ}}$, кДж	$P_{\text{ср}}$, кН	$d_{\text{лз}}$, мм
7,0	0,45	25,3	21	10,24	6,94

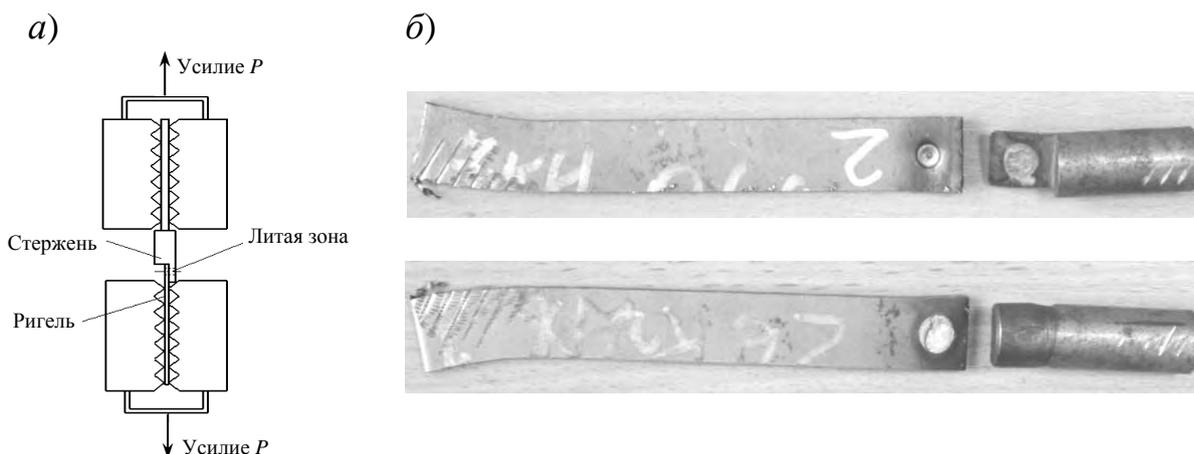


Рисунок 5.20 – Схема прочностных испытаний (а) и разрушенный образец (б)

Исследования основных этапов кинетики формирования соединения, проведенные ранее, позволили сделать вывод о том, что крутонарастающий импульс тока (даже при модуляции) не способен плавно деформировать рельеф [76]. Начиная с первых полупериодов включения тока происходит преждевременное расплавление рельефа с выплеском расплавленного металла из зоны контакта, после чего рельеф быстро сминается, детали касаются между собой всей поверхностью, а дальнейший ввод электрической энергии в межэлектродную зону становится неэффективным. Это в конечном итоге сказывается на формировании литой зоны и на прочностных показателях соединения.

С целью регулирования процесса деформирования рельефов и контроля количества электрической энергии, необходимой для формирования качественного соединения, был предложен новый способ контактной точечной и рельефной сварки (рисунок 5.21) [190]. Он включает предварительное сжатие деталей электродами с действующим в течение всей сварки постоянным усилием $F_{СВ} = F_{КОВ}$, пропускание через детали в течение времени $\tau_{СВ}$ импульса сварочного тока $I_{СВ}$, выключение тока и проковку сварного соединения в течение заданного времени $\tau_{КОВ}$. От известных данный способ отличается тем, что импульс сварочного тока задается многоступенчатым и длительность его протекания $\tau_{СВ}$ при задаваемых значениях тока $I_{СВ1}$, $I_{СВ2}$, ..., $I_{СВn}$ на каждой из ступеней импульса находят по формуле $\tau_{СВ} = \tau_{СВ\Phi1} + \tau_{СВ\Phi2} + \dots + \tau_{СВ\Phi n}$, где $\tau_{СВ\Phi1}$, $\tau_{СВ\Phi2}$, ..., $\tau_{СВ\Phi n}$ – фактическая длительность протекания тока на каждой из ступеней импульса.

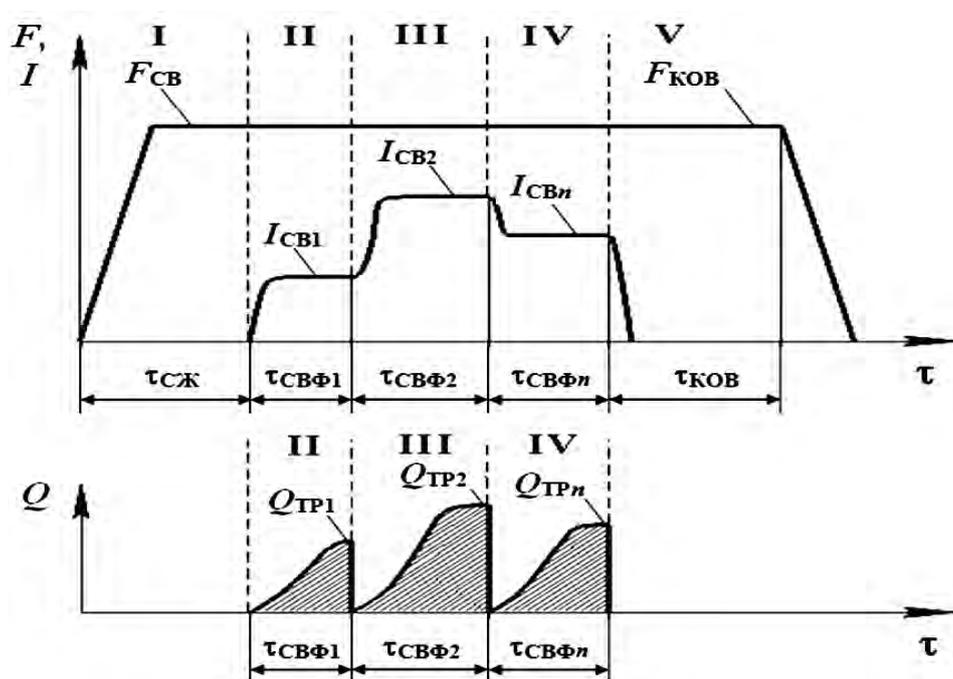


Рисунок 5.21 – Способ контактной точечной и рельефной сварки с многоступенчатым импульсом сварочного тока

Переключение ступеней импульса тока определяется фактическим достижением суммарной величиной электрической энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, требуемого значения, равного $Q_{ЭЭ} = Q_{ТР1} + Q_{ТР2} + \dots + Q_{ТРn}$, где $Q_{ТР1}$, $Q_{ТР2}$, ..., $Q_{ТРn}$ – количество электрической энергии, необходимое для ввода в межэлектродную зону для значений тока $I_{СВ1}$, $I_{СВ2}$, ..., $I_{СВn}$ на каждой из ступеней его импульса. На рисунке 5.22 представлена форма трехступенчатого импульса сварочного тока [50, 184].

Согласно данному способу требовалось определить количество электрической энергии, которое необходимо вложить в межэлектродную зону на

каждой из ступеней импульса. Для этого требовалось проанализировать кинетику формирования рельефного соединения [47]. После включения сварочного тока для обеспечения плавного увеличения скорости деформации рельефов и перемещения подвижного электрода металл зоны сварки необходимо нагревать до температуры разупрочнения более 400 К. По этим причинам уровень сварочного тока на первой ступени его импульса не может превышать 50...60 % от максимального $I_{2\max}$. Данная ступень импульса тока путем плавного нагрева должна стабилизировать процесс тепловыделения в местах контакта рельефов ригеля с площадками на стержнях, тем самым предотвратив преждевременное смятие рельефов. Наличие линейного контакта верхнего электрода со стержнями также обуславливает необходимость ограничения уровня сварочного тока на первой ступени импульса. На данном этапе электрическая энергия Q_{TP1} не должна превышать 5...10 % от полного расчетного количества электрической энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, требуемого для ввода в межэлектродную зону.

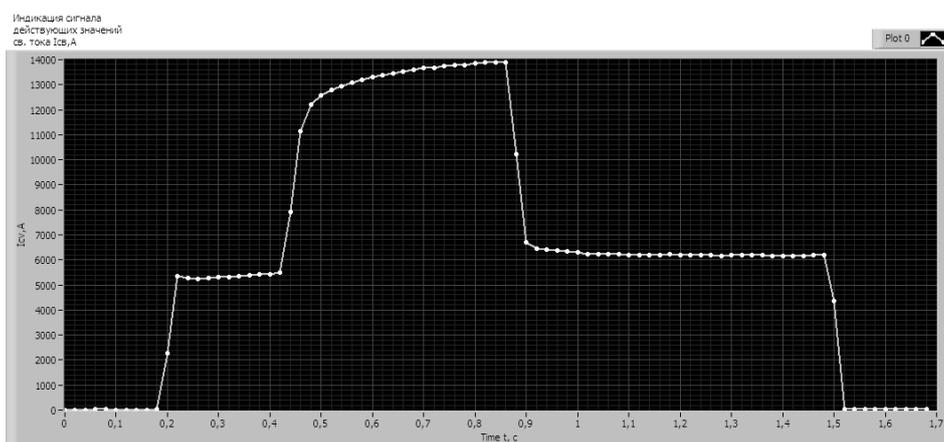


Рисунок 5.22 – Форма трехступенчатого импульса сварочного тока

Далее на втором участке импульса необходимо добиться появления и роста зон расплавления, которые приведут к интенсивной пластической деформации металла. В то же время процесс смятия рельефов должен сопровождаться интенсивным увеличением размеров контактных площадок. Добиться этого можно только повышением уровня сварочного тока до максимального $I_{2\max}$. На данном этапе электрическая энергия Q_{TP2} , вводимая в межэлектродную зону, должна составлять около 75...90 % от полного расчетного количества электрической энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$ с учетом требования достаточной жесткости режима.

Для предотвращения образования закалочных структур и остаточных напряжений в зоне сварки, особенно при наличии в пакете деталей из среднеуглеродистой стали, необходимо на третьем участке снизить уровень тока до 50 % от максимального $I_{2\max}$. Вводимая в межэлектродную зону

электрическая энергия $Q_{\text{ТРЗ}}$, обеспечиваемая данной ступенью импульса тока, не должна превышать 5...10 % от полного расчетного количества электрической энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$ [50].

Далее с помощью системы автоматического управления процессом КРС задавался трехступенчатый импульс тока [184]. Для сварки было выбрано наиболее предпочтительное соотношение задаваемого тока и вводимой электрической энергии (таблица 5.3). При этом задаваемое в системе количество электрической энергии, вводимой в межэлектродную зону, было уменьшено относительно значения, соответствующего сварке на расчетных режимах (21 кДж) (см. таблицу 5.2), до 13,5 кДж [50].

Таблица 5.3 – Соотношение задаваемого тока и вводимой электрической энергии

Первая ступень импульса	Вторая ступень импульса	Третья ступень импульса	$I_{2\text{max}}$, кА	$Q_{\text{ТР1}}$, кДж	$Q_{\text{ТР2}}$, кДж	$Q_{\text{ТР3}}$, кДж	$Q_{\text{ЭЭ}}$, кДж
50 % от I_{max}	100 % от I_{max}	50 % от I_{max}	25,3	5 % от $Q_{\text{ЭЭ}}$	90 % от $Q_{\text{ЭЭ}}$	5 % от $Q_{\text{ЭЭ}}$	13,5

После сварки были проведены прочностные испытания на срез, при этом десять образцов разрушились по основному металлу: пять образцов – по металлу ригеля, пять образцов – по металлу стержня (рисунок 5.23). Усилие разрыва при испытании сварных соединений на срез при тепловложении 13,5 кДж составило 11...12,5 кН.

а)



б)



а – по металлу ригеля; б – по металлу стержня

Рисунок 5.23 – Характер разрушения образцов, полученных при сварке с использованием системы автоматического управления процессом КРС засова

Далее с целью получения статистических данных была осуществлена КРС 16 засовов на режиме, обеспечиваемом регулятором цикла сварки (см. таблицу 5.2), с последующими прочностными испытаниями на срез. Статистика испытаний (рисунок 5.24) свидетельствует о повышении стабильности прочностных показателей пакетных соединений при КРС в сравнении с КТС (см. рисунок 1.19). Среднее усилие на срез составило $P_{CP} = 10,24$ кН. Разброс прочностных показателей пакетных соединений при КРС засовов на расчетном режиме не превышает 13 %.

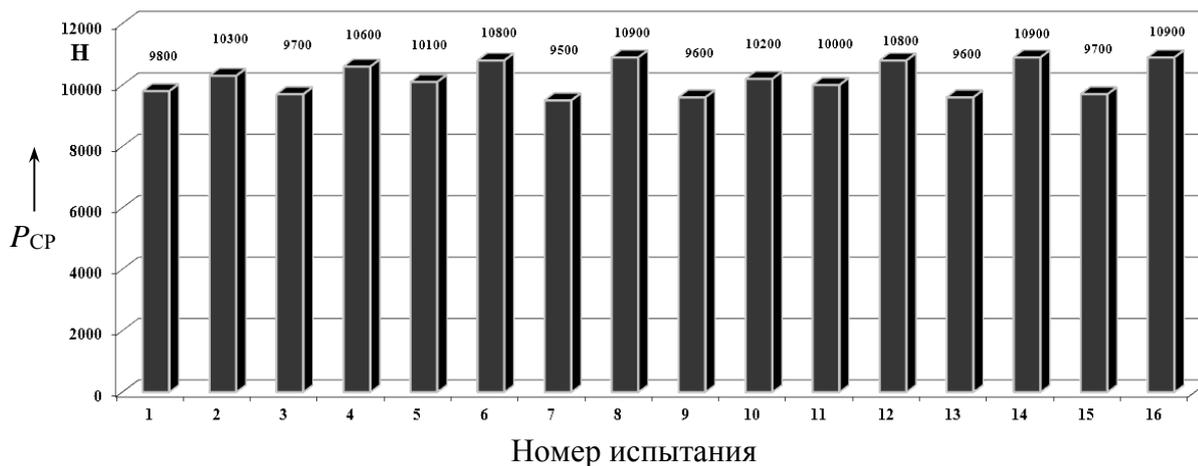


Рисунок 5.24 – Диаграмма прочностных испытаний соединений засовов при сварке на расчетных режимах, обеспечиваемых регулятором цикла сварки

После этого были осуществлены сварка 16 засовов на режимах с использованием системы автоматического регулирования (см. таблицу 5.3) и последующие прочностные испытания на срез. Статистика испытаний свидетельствует о повышении стабильности прочностных показателей соединений засовов (рисунок 5.25). Среднее усилие на срез составило $P_{CP} = 11,7$ кН. Разброс прочностных показателей соединений засовов не превысил 6...8 %.

Макрошлифы соединений засова, полученных при КРС на расчетных режимах (рисунок 5.26, а) и при КРС с использованием системы автоматического регулирования (рисунок 5.26, б), показали, что при применении ступенчатого импульса сварочного тока с активным контролем энергии тепловложения на каждом из участков импульса возможно некоторое снижение суммарной энергии $Q_{ЭЭ}$ (с 21 до 13,5 кДж), при этом ширина литой зоны не уменьшается, что свидетельствует о снижении энергии тепловых потерь и перераспределении теплового баланса в зоне соединения ригеля со стержнем.

Разработанный технологический процесс рельефной сварки позволил добиться высокой точности расположения стержней относительно ригеля (отклонение от параллельности стержней в пределах допустимых заводских норм) и снижения энергопотребления контактной сварочной машиной при обеспечении требуемых прочностных характеристик соеди-

нения (среднее усилие на срез составило $P_{\text{CP}} = 11,7$ кН). Разброс прочностных показателей соединений засовов не превышает 6...8 %. Прочность соединений, по сравнению со штамповкой, увеличилась в 2,2...2,5 раза. Технологический процесс рельефной сварки засовов замков с активным контролем энергии тепловложения был внедрен в производство на ОАО «Могилевский завод «Строммашина» [186].

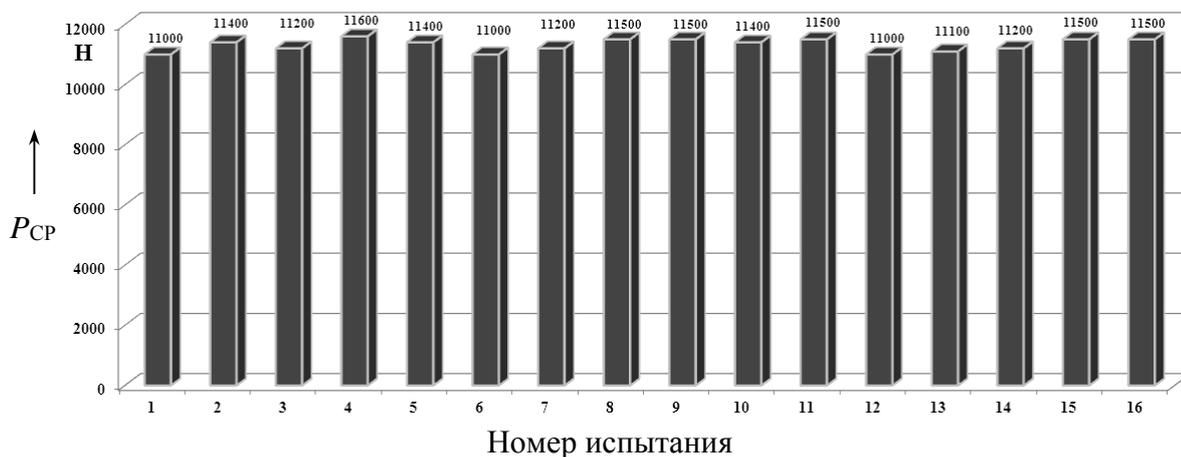
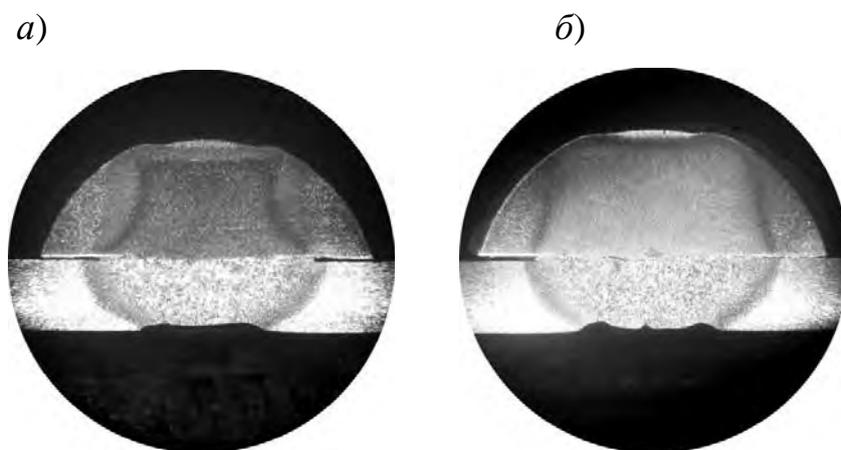


Рисунок 5.25 – Диаграмма прочностных испытаний сварных соединений засовов с использованием системы автоматического регулирования



a – при сварке на расчетных режимах; *б* – при сварке с использованием системы активного контроля энергии тепловложения

Рисунок 5.26 – Макрошлифы сварных соединений засова

Выводы

Разработана система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону, выполняющая следующие задачи:

– внешнее воздействие на аппаратуру управления контактной машины с целью независимого программного задания величины и длительности протекания сварочного тока;

– обеспечение введения в зону сварки точного количества электрической энергии для образования сварного соединения требуемых размеров и формы со стабильными прочностными характеристиками без прерывания технологического цикла в режиме реального времени.

В результате моделирования процессов КРС многослойного соединения на базе анализа кривых перемещения и скорости перемещения подвижного электрода были определены основные этапы кинетики формирования рельефных многослойных соединений. Установлено, что проплавление деталей можно снизить до минимальной величины, достаточной для обеспечения прочности соединения, при экономии затрат электроэнергии сварочной машины.

Установлено, что изменение усилия сжатия электродов при контактной рельефной сварке многослойных соединений существенно влияет на активное сопротивление межэлектродной зоны и приводит к изменению напряжения и сварочного тока. Параметрами, обобщающими все эти величины, являются мощность и энергия тепловложения в межэлектродную зону, которые достаточно полно характеризуют протекание процесса сварки и позволяют прогнозировать качество выполняемого соединения.

Разработан технологический процесс рельефной сварки засова замка сувальдного, обеспечивающий высокую точность расположения стержней относительно ригеля за счет применения приспособления для сборки и сварки, снижение энергопотребления контактной сварочной машины и получение требуемых прочностных характеристик соединения.

6 Разработка корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

6.1 Фазовое регулирование переменного напряжения и тока при контактной сварке

Фазовое регулирование базируется на управлении действующим значением переменного напряжения питания трансформатора сварочного ТС путем изменения длительности открытого состояния одного из включенных встречно-параллельно тиристоров VS1, VS2 тиристорного контактора ТК в течение полупериода сетевого напряжения. Электрическая схема замещения силовой части сварочной машины представлена на рисунке 6.1.

Для вычисления тепловложения в межэлектродную зону в процессе контактной сварки необходимо иметь информацию о сопротивлении $R_{ЭЭ}$ участка электрод–электрод, что подразумевает измерение действующего значения вторичного тока I_2 и напряжения между электродами сварочной машины $U_{ЭЭ}$. Полное сопротивление Z_2 контактной машины, определяемое величинами активного и индуктивного сопротивлений вторичного контура R_2 и X_2 и приведенных к вторичному витку активного и индуктивного сопротивлений первичной обмотки R'_1 и X'_1 , определяет ток I_2 во вторичном контуре в соответствии с известной схемой замещения сварочного трансформатора (рисунок 6.2, а) [191].

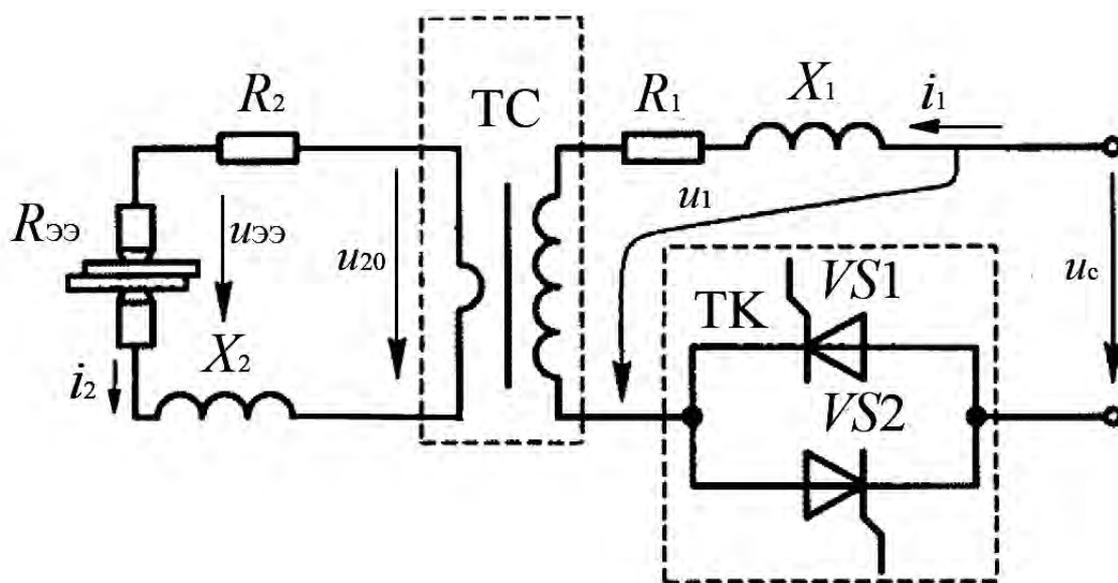


Рисунок 6.1 – Электрическая схема замещения силовой части машины для контактной сварки

Для математического описания метода фазового регулирования при контактной сварке требуется определить взаимосвязь параметров регулирования (угол открытия тиристоров α , коэффициент трансформации сварочного трансформатора K_T на выбранной ступени), сетевого напряжения u_C , общего сопротивления сварочного контура (активное $R_{2K} = R'_1 + R_2$ и индуктивное $X_{2K} = X'_1 + X_2$ сопротивления контура с учетом всех составляющих и активное сопротивление $R_{ЭЭ}$ участка электрод–электрод) (рисунок 6.2, а) и параметров режима сварки (вторичный ток I_2 , напряжение между электродами при сварке $U_{ЭЭ}$, мощность $P_{ЭЭ}$ и энергия $Q_{ЭЭ}$ тепловложения в межэлектродную зону).

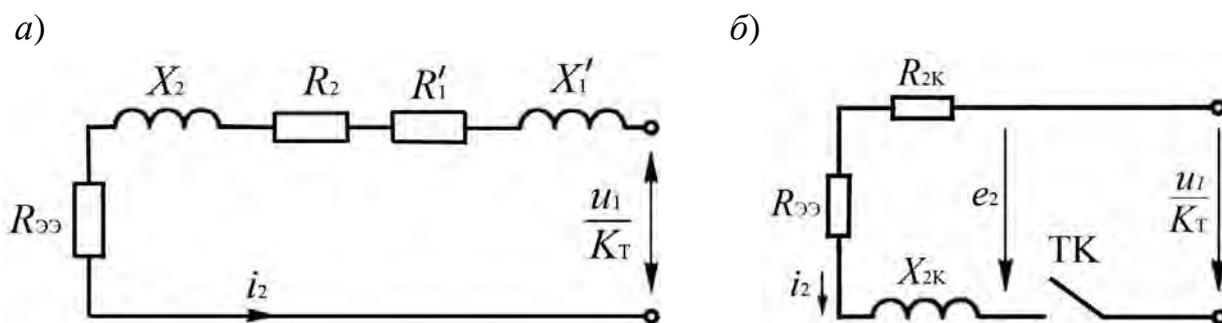


Рисунок 6.2 – Электрическая схема замещения контактной сварочной машины (а) и составляющие общего сопротивления сварочного контура (б)

Для упрощения математических расчетов за начало отсчета времени $t = 0$ принимаем момент включения тиристорного контактора ТК (см. рисунок 6.2, б). В этом случае напряжение сети будет задаваться как

$$u_C = U_{CM} \cdot \sin(\omega t + \alpha) = \sqrt{2}U_C \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (6.1)$$

где α – угол открытия тиристоров;

ω – угловая частота напряжения сети;

U_{CM} – амплитудное значение напряжения сети;

U_C – действующее значение напряжения сети (рисунок 6.3).

Тогда напряжение u_1 , подаваемое на первичную обмотку сварочного трансформатора (см. рисунок 6.1), будет задаваться как

$$u_1(t) \approx u_C(t) \quad \text{при } 0 < \omega t < \lambda, \quad (6.2)$$

где λ – длительность включенного состояния тиристоров.

При этом напряжение u_1 на выводах первичной обмотки трансформатора будет несколько ниже напряжения сети u_C в связи с падением напряжения на входных сетевых кабелях и на тиристорном контакторе.

где $U_{20\Pi}$ – действующее значение напряжения холостого хода на вторичной обмотке трансформатора при его полнофазном включении, т. е. напряжение синусоидальной формы при отсутствии фазового регулирования.

Результаты расчета по формуле (6.5) коэффициента k_U регулирования напряжения представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Зависимость коэффициента k_U регулирования напряжения от угла открытия тиристорov α и коэффициента мощности $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	Коэффициент регулирования напряжения k_U						
	Угол открытия тиристорov α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,987	0,898	0,798	0,69	0,575
0,3	–	–	0,945	0,861	0,766	0,663	0,554
0,4	–	0,978	0,909	0,829	0,739	0,641	0,536
0,5	1,000	0,945	0,879	0,802	0,715	0,62	0,52
0,6	0,97	0,918	0,853	0,778	0,693	0,601	0,504
0,7	0,945	0,893	0,83	0,756	0,673	0,583	0,489
0,8	0,924	0,873	0,81	0,737	0,655	0,566	0,473

При сварке деталей полное сопротивление Z_2 сварочного контура контактной машины включает в себя также электрическое сопротивление $R_{ЭЭ}$ деталей, зажатых между электродами (см. рисунок 6.2):

$$Z_2 = \sqrt{(R_{2К} + R_{ЭЭ})^2 + X_{2К}^2} . \quad (6.6)$$

Тогда полнофазный сварочный ток $I_{2\Pi}$ синусоидальной формы при отсутствии фазового регулирования определяется в зависимости от полнофазного напряжения холостого хода $U_{20\Pi}$ сварочного трансформатора как

$$I_{2\Pi} = \frac{U_{20\Pi}}{Z_2} . \quad (6.7)$$

Индуктивное сопротивление $X_{2К}$ замедляет нарастание тока i_2 при отпирании тиристорov и препятствует его уменьшению при снижении напряжения u_1 . Ток i_2 продолжает протекать через нагрузку и соответствующий тиристор и после перехода напряжения питания через нуль, достигая нулевого значения спустя некоторый интервал в пределах очередной полуволны напряжения u_1 . Интервал проводимости тиристорov λ увеличивается, за счет



чего в кривой u_1 появляются дополнительные участки напряжения, а интервал паузы в кривой выходного напряжения сокращается (см. рисунок 6.3).

Эквивалентную ЭДС e_2 (см. рисунок 6.2, б), прикладываемую к схеме замещения, в этом случае можно описать как

$$e_2 = u_{20} = E_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha) = \sqrt{2}U_{20} \cdot \sin(\omega t + \alpha). \quad (6.8)$$

Тогда уравнение электрического состояния цепи после включения тиристорного контактора ТК примет следующий вид:

$$L_{2K} \frac{di_2}{dt} + (R_{2K} + R_{ЭЭ})i_2 = e_2, \quad (6.9)$$

где L_{2K} – приведенная индуктивность сварочной машины, $L_{2K} = X_{2K}/\omega$.

Реальный ток i_2 во вторичном контуре будет складываться из принужденного $i_{\text{ПР}}$ и свободного i_C токов [54]:

$$i_2 = i_{\text{ПР}} + i_C. \quad (6.10)$$

Принужденный ток $i_{\text{ПР}}$ (его называют также установившимся полнофазным током) является частным решением уравнения (6.9) для установившегося режима при $t \rightarrow \infty$ и рассчитывается как

$$i_{\text{ПР}} = I_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi), \quad (6.11)$$

где

$$I_{2M} = \frac{E_M}{z_2} = \frac{\sqrt{2}U_{20\Pi}}{z_2} = \sqrt{2} \cdot I_{2\Pi};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_{2K}}{R_{2K} + R_{ЭЭ}}.$$

Свободный ток i_C является общим решением уравнения (6.9) при отсутствии источника питания. Он обусловлен изменением энергии магнитного поля индуктивного элемента и вычисляется из уравнения

$$L_{2K} \frac{di_2}{dt} + (R_{2K} + R_{ЭЭ})i_2 = 0. \quad (6.12)$$



Решение уравнения (6.12) имеет вид [54]:

$$i_C = Ae^{pt}, \quad (6.13)$$

где A – постоянная интегрирования;

p – корень характеристического уравнения.

$$L_{2K}p + (R_{2K} + R_{ЭЭ}) = 0, \quad (6.14)$$

отсюда

$$p = -\frac{R_{2K} + R_{ЭЭ}}{L_{2K}} = -\frac{R_{2K} + R_{ЭЭ}}{\omega L_{2K}} \omega = -\omega \cdot \text{ctg}\varphi.$$

Таким образом, из (6.10), (6.11), (6.13) и (6.14) имеем ток во вторичном контуре, вычисляемый как

$$i_2 = i_{\text{ПР}} + i_C = I_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + A \cdot \exp(-\text{ctg}\varphi \cdot \omega t). \quad (6.15)$$

Постоянная интегрирования A определяется из значения тока i_2 в момент коммутации $t = 0$. Поскольку в соответствии с первым законом коммутации ток через индуктивный элемент не может изменяться скачкообразно, значение его $i_2(0+)$ в первый момент коммутации будет равно значению $i_2(0-)$ в момент, предшествующий коммутации, т. е. нулю. Исходя из этого, уравнение (6.15) примет вид:

$$i_2(0) = i_2(0-) = i_2(0+) = I_{2M} \cdot \sin(\alpha - \varphi) + A = 0, \quad (6.16)$$

отсюда

$$A = -I_{2M} \cdot \sin(\alpha - \varphi).$$

Окончательное выражение для тока во вторичном контуре [54, 195]

$$i_2(\omega t) = i_{\text{ПР}} + i_C = I_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_{2M} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\text{ctg}\varphi \cdot \omega t). \quad (6.17)$$

Момент естественного прекращения протекания тока $i_2(\omega t) = 0$ и продолжительность λ его включения определяются равенством абсолютных величин токов $i_{\text{ПР}}$ и i_C (см. рисунок 6.3).



При этом длительность включения тиристоров определяется как первый ненулевой корень уравнения (6.17) $i_2(\omega t) = 0$, т. е.

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) / \sin(\alpha - \varphi) = \exp(-\lambda \cdot \text{ctg}\varphi). \quad (6.18)$$

Вместе с тем действующее значение вторичного тока I_2 в одном полупериоде ($\omega T = \pi$) с учетом того, что по формуле (6.11) $I_{2M} = \sqrt{2} \cdot I_{2\Pi}$, определяется интегралом

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_0^\lambda i_2^2(\omega t) d(\omega t)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\lambda (I_{2M} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_{2M} \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\text{ctg}\varphi \cdot \omega t))^2 d(\omega t)} = \\ &= \sqrt{\frac{I_{2M}^2}{\pi} \int_0^\lambda (\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\text{ctg}\varphi \cdot \omega t))^2 d(\omega t)} = \\ &= I_{2\Pi} \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^\lambda (\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\text{ctg}\varphi \cdot \omega t))^2 d(\omega t)} = I_{2\Pi} \cdot k_I. \quad (6.19) \end{aligned}$$

При включении контактной сварочной машины через тиристорный контактор с углом $\alpha > \varphi$ ток i_2 во вторичном контуре становится прерывистым и отличается от синусоидального (см. рисунок 6.3). При этом действующее значение тока I_2 и полнофазный ток $I_{2\Pi}$ связаны между собой через коэффициент k_I регулирования сварочного тока по формуле (6.19). Выражение для определения коэффициента регулирования тока

$$k_I = \frac{I_2}{I_{2\Pi}} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^\lambda i_2'^2(\omega t) d(\omega t)}, \quad (6.20)$$

где i_2' – значение тока i_2 , отн. ед.; $i_2' = i_2 / I_{2M}$ [195].

После интегрирования выражения (6.20) получим



$$k_I = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{1}{2\pi} [\sin 2(\lambda + \alpha - \varphi) - \sin 2(\alpha - \varphi)] + \frac{4}{\pi} \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi) [\exp(-\lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \sin(\lambda + \alpha) - \sin \alpha] - \frac{\sin^2(\alpha - \varphi) \operatorname{tg} \varphi}{\pi} [\exp(-2\lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi) - 1]}. \quad (6.21)$$

В момент естественного угасания тиристором $\omega t = \lambda$ вторичный ток $i_2(\omega t) = 0$. Подставляем значение $\exp(-\lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi)$ из (6.18) в (6.21) и после соответствующих преобразований получаем значение коэффициента k_I регулирования сварочного тока для различных углов включения тиристором α и коэффициентов мощности сварочной машины $\cos \varphi$ [22, 54, 192–194].

$$k_I = \frac{I_2}{I_{2П}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin \lambda}{\pi \cos \varphi} \cos(2\alpha + \varphi + \lambda)}, \quad (6.22)$$

где α, λ, φ – углы, рад.

Для расчета по формуле (6.22) зависимости k_I от параметров фазового регулирования α и $\cos \varphi$ требуется прежде всего на основании графического решения уравнения (6.18) в программной среде Mathcad для дискретных значений $\cos \varphi$ и α получить значения длительности включенного состояния тиристором λ , регистрация которых в каждом полупериоде для заданного значения α позволяет определять величину $\cos \varphi$ [54, 196–200]. Расчет этих значений может быть представлен в виде таблицы 6.2 [54]. Расчеты коэффициента k_I регулирования сварочного тока по формуле (6.22) приведены в таблице 6.3.

Значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ изменяется в процессе сварки под действием различных факторов: динамического сопротивления $r_{ЭЭ}$ участка электрод–электрод; варьирования индуктивного сопротивления $X_{2К}$ и полного сопротивления Z_2 сварочного контура вследствие внесения в него ферромагнитных масс и изменения его габаритов при настройке на сварку новых деталей; изменения активной составляющей сопротивления $R_{2К}$ вследствие нагрева элементов контура и его износа.

Таким образом, при построении систем автоматического управления возникает необходимость применения высокопроизводительных вычислительных средств, позволяющих отслеживать изменение $\cos \varphi$ в реальном времени.



Таблица 6.2 – Длительность включенного состояния тиристоров λ в зависимости от значений α и $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	Длительность включенного состояния тиристоров λ , рад						
	Угол открытия тиристоров α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	3,1	2,828	2,546	2,255	1,956
0,3	–	–	2,96	2,709	2,447	2,176	1,895
0,4	–	3,063	2,836	2,601	2,356	2,102	1,837
0,5	3,142	2,935	2,721	2,5	2,269	2,029	1,779
0,6	3,009	2,812	2,609	2,399	2,181	1,954	1,718
0,7	2,875	2,686	2,492	2,292	2,086	1,873	1,65
0,8	2,728	2,545	2,359	2,17	1,976	1,775	1,568

Таблица 6.3 – Зависимость коэффициента k_I регулирования сварочного тока от значений α и $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	Коэффициент регулирования сварочного тока k_I						
	Угол открытия тиристоров α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,975	0,811	0,651	0,499	0,362
0,3	–	–	0,894	0,751	0,606	0,469	0,343
0,4	–	0,958	0,833	0,703	0,573	0,447	0,33
0,5	1,000	0,897	0,785	0,668	0,548	0,431	0,321
0,6	0,943	0,851	0,749	0,641	0,53	0,42	0,316
0,7	0,901	0,817	0,724	0,623	0,519	0,416	0,316
0,8	0,871	0,795	0,709	0,616	0,518	0,419	0,322

6.2 Фазовое регулирование мощности во вторичном контуре сварочной машины

Для построения системы автоматического регулирования мощности при рельефной сварке необходимо знать зависимости мощности, потребляемой машиной из сети, и мощности тепловложения в межэлектродную зону от сварочного тока и сопротивления деталей. Эти зависимости могут быть представлены следующими формулами [191, 192].

Зависимость полной мощности, потребляемой машиной из сети, от сварочного тока

$$S_1 = U_1 I_1 = U_{20} I_2 = \frac{U_{20}^2}{Z_2} = \frac{U_{20}^2}{\sqrt{(R_{2К} + R_{ЭЭ})^2 + X_{2К}^2}}. \quad (6.23)$$

Зависимость активной мощности, потребляемой из сети, от сварочного тока

$$P_1 = S_1 \cos \varphi = I_2^2 (R_{2К} + R_{ЭЭ}). \quad (6.24)$$

Внешняя вольт-амперная характеристика контактной сварочной машины представляет собой зависимость падения напряжения на свариваемых деталях U_2 от величины сварочного тока I_2

$$U_2 = \sqrt{U_{20}^2 - I_2^2 X_{2К}^2} - I_2 R_{2К}. \quad (6.25)$$

Точка пересечения внешней характеристики и линии падения напряжения на свариваемых деталях $I_2 R_{ЭЭ}$ определяет сварочный ток машины $I_{СВ}$ и напряжение межэлектродной зоны $U_{ЭЭ}$ для данной ступени регулирования трансформатора (рисунок 6.4) [191, 192, 201].

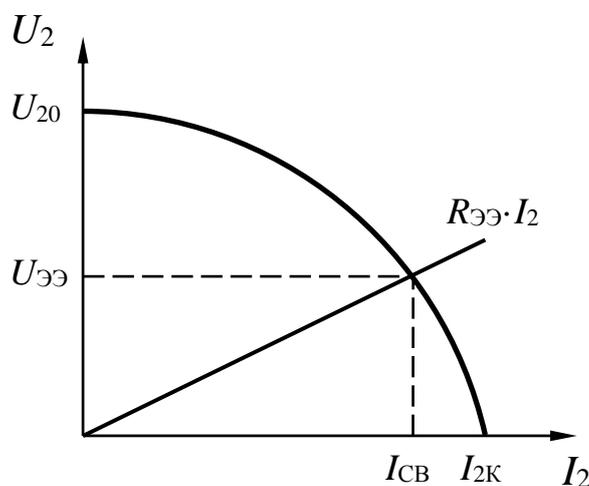


Рисунок 6.4 – Вольт-амперная характеристика сварочной машины

Зависимость активной мощности тепловложения в межэлектродную зону от сварочного тока

$$P_2 = I_2 U_2 = I_2 \left(\sqrt{U_{20}^2 - I_2^2 X_{2К}^2} - I_2 R_{2К} \right) = I_2^2 R_{ЭЭ}. \quad (6.26)$$

Зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi$ от параметров машины и сопротивления деталей имеет следующий вид [192]:



$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{R_{2K} + R_{\text{ЭЭ}}}{\sqrt{(R_{2K} + R_{\text{ЭЭ}})^2 + X_{2K}^2}} = \frac{R_{2K} + R_{\text{ЭЭ}}}{Z_2} = \frac{I_2 (R_{2K} + R_{\text{ЭЭ}})}{U_{20}} = \\ &= \frac{I_2 \sqrt{R_{2K}^2 + X_{2K}^2} \cos \varphi_K + I_2 R_{\text{ЭЭ}}}{U_{20}}, \end{aligned} \quad (6.27)$$

где $\cos \varphi_K$ – коэффициент мощности при коротком замыкании контактной сварочной машины, $\cos \varphi_K = R_{2K} / Z_{2K}$.

Зависимость коэффициента полезного действия η сварочной машины от сварочного тока и сопротивления деталей [192]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{S_1 \cos \varphi} = \frac{I_2^2 R_{\text{ЭЭ}}}{U_{20} I_2 \cos \varphi} = \frac{R_{\text{ЭЭ}}}{R_{2K} + R_{\text{ЭЭ}}}. \quad (6.28)$$

Коэффициент k_S регулирования полной мощности, потребляемой сварочной машиной из сети, можно определить из формул (6.5) и (6.22) по следующему выражению [194, 200]:

$$\begin{aligned} k_S &= k_U \cdot k_I = \frac{U_{20}}{U_{20\Pi}} \frac{I_2}{I_{2\Pi}} = \frac{S_1}{S_{1\Pi}} = \\ &= \sqrt{\frac{2\lambda + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\lambda)}{2\pi}} \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} - \frac{\sin \lambda}{\pi \cos \varphi} \cos(2\alpha + \varphi + \lambda)}. \end{aligned} \quad (6.29)$$

Расчеты по формуле (6.29) позволяют наглядно представить зависимость коэффициента k_S регулирования полной мощности от параметров фазового регулирования α и $\cos \varphi$ (таблица 6.4, рисунок 6.5). Функция $k_S = f(\alpha)$ может быть аппроксимирована нелинейной зависимостью

$$k_S = f(\alpha) = A_3 \alpha^3 + A_2 \alpha^2 + A_1 \alpha + A_0, \quad (6.30)$$

где коэффициенты A_0, A_1, A_2 и A_3 могут быть представлены функциями

$$A_3 = f_3(\cos \varphi); A_2 = f_2(\cos \varphi); A_1 = f_1(\cos \varphi); A_0 = f_0(\cos \varphi).$$



Таблица 6.4 – Зависимость коэффициента k_S регулирования полной мощности угла регулирования α при заданном $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	Коэффициент регулирования полной мощности k_S						
	Угол открытия тиристорov α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,962	0,729	0,520	0,344	0,208
0,3	–	–	0,845	0,646	0,465	0,311	0,190
0,4	–	0,937	0,757	0,583	0,423	0,286	0,177
0,5	1,000	0,848	0,690	0,535	0,392	0,267	0,167
0,6	0,915	0,781	0,639	0,499	0,367	0,252	0,159
0,7	0,851	0,730	0,601	0,471	0,350	0,243	0,154
0,8	0,805	0,694	0,574	0,454	0,339	0,237	0,153

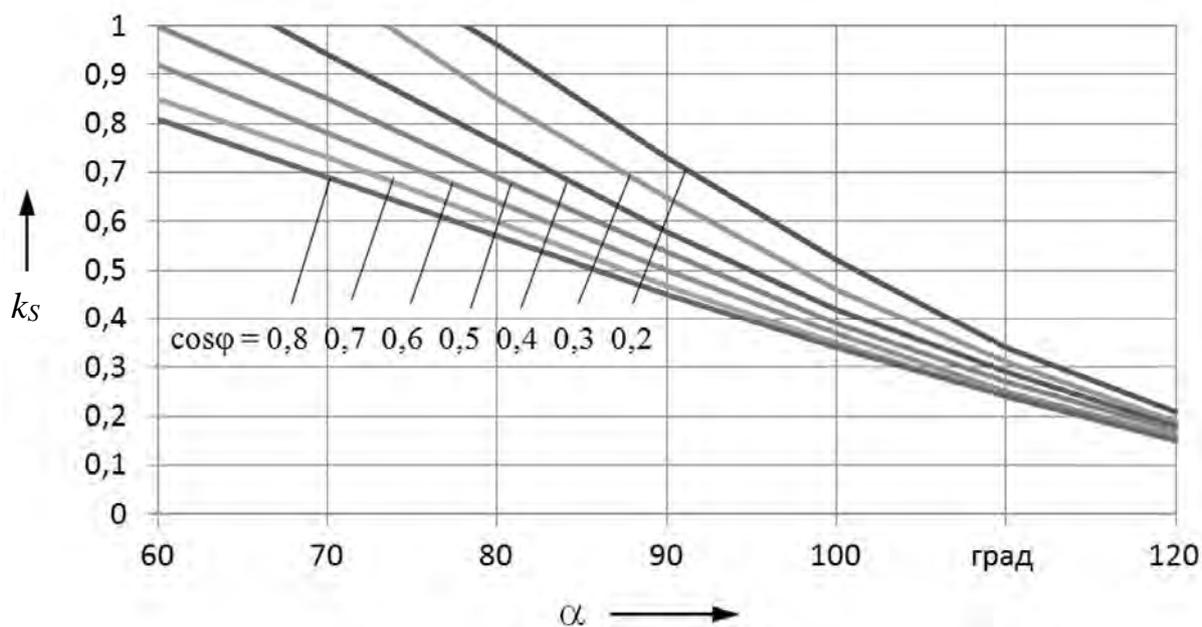


Рисунок 6.5 – Зависимость коэффициента k_S регулирования полной мощности от угла регулирования α при заданном $\cos\varphi$

Использование сварочной машины по установленной мощности и ее производительность зависят от настройки регулятора цикла сварки (его фазосдвигающего устройства) на коэффициент мощности $\cos\varphi$ цепи нагрузки. В зависимости от типа машины, диапазонов свариваемых толщин и марок материалов, а также для различных вылетов и растворов машины коэффициент мощности может составлять $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,8$ [22].

Кроме того, стабильный и рациональный режим работы тиристорного контактора обеспечивается при выполнении условия $\varphi + 5^\circ < \alpha < \varphi + 60^\circ$

[54, 192, 193]. При $\alpha > \varphi + 60^\circ$ происходит так называемое «глубокое» фазовое регулирование сварочного тока, в результате которого значительно искажается синусоидальная форма напряжений и токов в обмотках трансформатора, что приводит к появлению в них высокочастотных гармоник и увеличению полного сопротивления Z_2 сварочной машины.

Определим значения коэффициентов A_0, A_1, A_2 и A_3 для заданных значений $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,8$. Для этого каждому значению $\cos\varphi$ сопоставим систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} f(\alpha_3) = A_3\alpha_3^3 + A_2\alpha_3^2 + A_1\alpha_3 + A_0; \\ f(\alpha_2) = A_3\alpha_2^3 + A_2\alpha_2^2 + A_1\alpha_2 + A_0; \\ f(\alpha_1) = A_3\alpha_1^3 + A_2\alpha_1^2 + A_1\alpha_1 + A_0; \\ f(\alpha_0) = A_3\alpha_0^3 + A_2\alpha_0^2 + A_1\alpha_0 + A_0. \end{cases} \quad (6.31)$$

Для диапазона изменений угла регулирования $\alpha = 60 \dots 120^\circ$ (см. рисунок 6.5) определим узлы интерполяции $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$ и α_0 исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [54, 202, 203]

$$a_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \quad (6.32)$$

где a, b – границы отрезка интерполяции, $[a, b] = [60, 120^\circ]$;

n – максимальный номер узла интерполяции, $n = 3$;

m – номер узла интерполяции, $m = 0, 1, 2, 3$.

Результаты расчета по формуле (6.32) представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Определение границ отрезка интерполяции $[a, b]$ и узлов интерполяции $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ для заданных значений $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	a , град	b , град	α_3 , град	α_2 , град	α_1 , град	α_0 , град
0,2...0,8	60	120	117,72	101,48	78,52	62,28

С учетом выбранных узлов интерполяции $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$ и α_0 решаем семь систем уравнений (6.31) для каждого из значений $\cos\varphi = [0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8]$ (см. рисунок 6.5). Значения функций $f(\alpha_3), f(\alpha_2), f(\alpha_1)$ и $f(\alpha_0)$ вычисляем по формулам (6.18) и (6.29). Результаты расчета значения коэффициентов A_3, A_2, A_1 и A_0 для каждой системы сводим в таблицу 6.6. Таким образом, семейство аппроксимирующих функций $k_{Sn} = f(\alpha)$ для



различных значений $\cos\varphi$ (см. рисунок 6.5) выглядит следующим образом (таблица 6.7) [194].

Таблица 6.6 – Вычисление семейства аппроксимирующих функций для коэффициента регулирования полной мощности $k_{Sn} = f(\alpha)$

$\cos\varphi$	α_3 , рад	α_2 , рад	α_1 , рад	α_0 , рад	$f(\alpha_3)$	$f(\alpha_2)$	$f(\alpha_1)$	$f(\alpha_0)$	A_3	A_2	A_1	A_0
0,2	2,055	1,771	1,37	1,087	0,236	0,491	0,999	1,398	0,340	-1,230	0,064	2,344
0,3	2,055	1,771	1,37	1,087	0,215	0,441	0,876	1,211	0,286	-1,066	0,134	1,958
0,4	2,055	1,771	1,37	1,087	0,2	0,401	0,783	1,072	0,266	-1,023	0,284	1,631
0,5	2,055	1,771	1,37	1,087	0,187	0,372	0,714	0,966	0,247	-0,990	0,417	1,364
0,6	2,055	1,771	1,37	1,087	0,179	0,349	0,66	0,886	0,232	-0,948	0,474	1,192
0,7	2,055	1,771	1,37	1,087	0,173	0,333	0,62	0,825	0,217	-0,903	0,510	1,060
0,8	2,055	1,771	1,37	1,087	0,17	0,323	0,592	0,781	0,204	-0,866	0,533	0,963

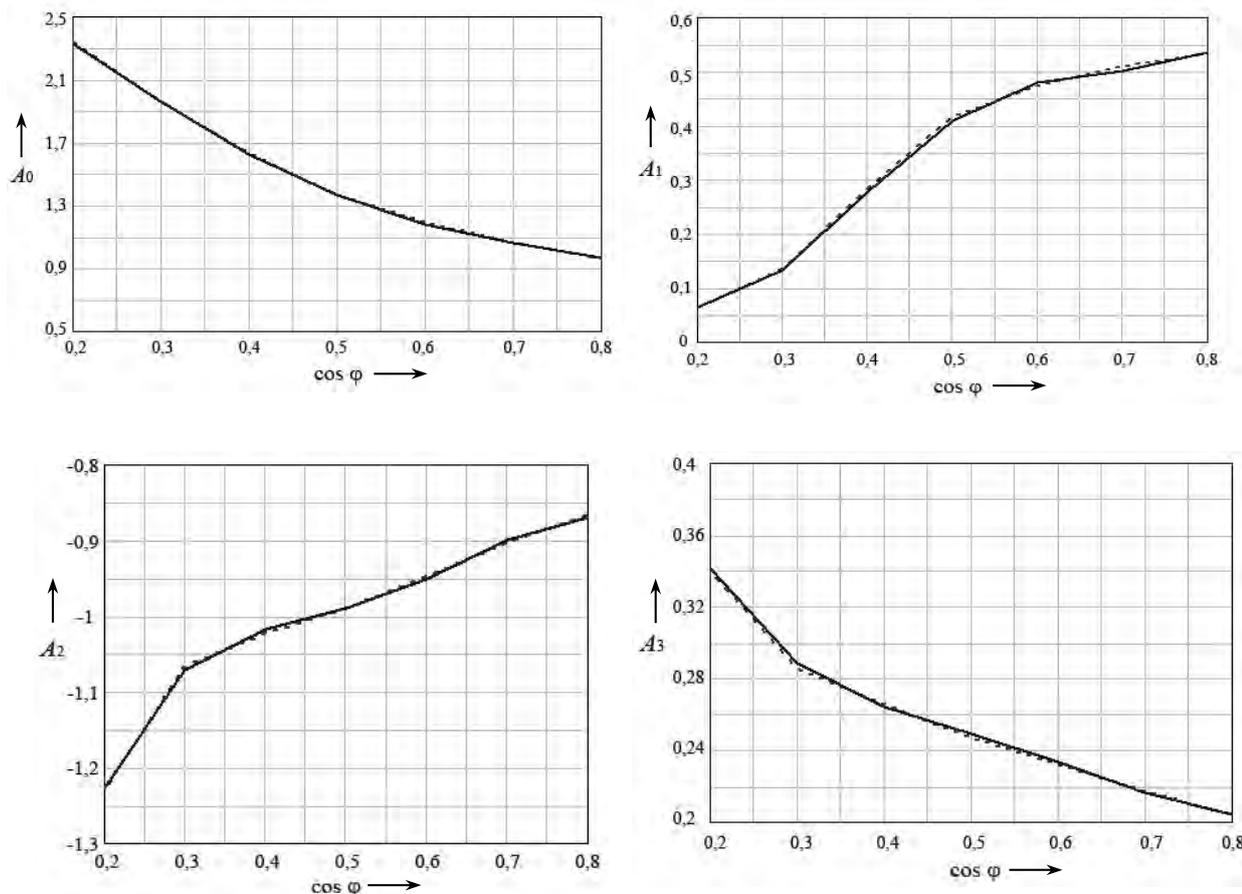
Таблица 6.7 – Семейство аппроксимирующих функций $k_{Sn} = f(\alpha)$

$\cos\varphi$	$k_{Sn} = f(\alpha)$
0,2	$\left\{ \begin{array}{l} k_{s_2}(\alpha) = 0,34\alpha^3 - 1,23\alpha^2 + 0,064\alpha + 2,344; \\ k_{s_3}(\alpha) = 0,286\alpha^3 - 1,066\alpha^2 + 0,134\alpha + 1,958; \\ k_{s_4}(\alpha) = 0,266\alpha^3 - 1,023\alpha^2 + 0,284\alpha + 1,631; \\ k_{s_5}(\alpha) = 0,247\alpha^3 - 0,99\alpha^2 + 0,417\alpha + 1,364; \\ k_{s_6}(\alpha) = 0,232\alpha^3 - 0,948\alpha^2 + 0,474\alpha + 1,192; \\ k_{s_7}(\alpha) = 0,217\alpha^3 - 0,903\alpha^2 + 0,51\alpha + 1,06; \\ k_{s_8}(\alpha) = 0,204\alpha^3 - 0,866\alpha^2 + 0,533\alpha + 0,963 \end{array} \right. \quad (6.33)$
0,3	
0,4	
0,5	
0,6	
0,7	
0,8	

Представим значения коэффициентов A_3 , A_2 , A_1 и A_0 в виде графиков (показаны на рисунке 6.6 штриховыми линиями). Аппроксимация данных графиков возможна многочленами четвертой степени:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = f_0(\cos\varphi) = B_4 \cos^4 \varphi + B_3 \cos^3 \varphi + B_2 \cos^2 \varphi + B_1 \cos \varphi + B_0; \\ A_1 = f_1(\cos\varphi) = C_4 \cos^4 \varphi + C_3 \cos^3 \varphi + C_2 \cos^2 \varphi + C_1 \cos \varphi + C_0; \\ A_2 = f_2(\cos\varphi) = D_4 \cos^4 \varphi + D_3 \cos^3 \varphi + D_2 \cos^2 \varphi + D_1 \cos \varphi + D_0; \\ A_3 = f_3(\cos\varphi) = E_4 \cos^4 \varphi + E_3 \cos^3 \varphi + E_2 \cos^2 \varphi + E_1 \cos \varphi + E_0. \end{array} \right. \quad (6.34)$$





----- по расчетным значениям (см. таблицу 6.6); — по аппроксимирующим зависимостям (6.34) (таблица 6.8)

Рисунок 6.6 – Графики функций коэффициентов $A_0 = f_0(\cos\varphi)$, $A_1 = f_1(\cos\varphi)$, $A_2 = f_2(\cos\varphi)$, $A_3 = f_3(\cos\varphi)$

На отрезке $\cos\varphi = 0,2\dots 0,8$ узлы интерполяции зададим исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [54, 202, 203]

$$\cos\varphi_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \quad (6.35)$$

где n – максимальный номер узла интерполяции, $n = 4$;

m – номер узла интерполяции, $m = 0, 1, 2, 3, 4$.

Решая уравнение (6.35), для $m = 0, 1, 2, 3, 4$ получим узлы интерполяции $\cos\varphi = [0,79; 0,68; 0,50; 0,32; 0,21]$. С учетом выбранных узлов интерполяции из уравнений (6.34) запишем четыре системы уравнений для получения искоемых коэффициентов $B_0 - B_4$, $C_0 - C_4$, $D_0 - D_4$ и $E_0 - E_4$ (см. таблицу 6.8).

Таблица 6.8 – Расчет искомых коэффициентов $B_0 - B_4$, $C_0 - C_4$, $D_0 - D_4$, $E_0 - E_4$

Значение функций	Узел интерполяции, $\cos\varphi$					Значение коэффициентов				
	0,79	0,68	0,5	0,32	0,21					
						B_4	B_3	B_2	B_1	B_0
$A_0 = f_0(\cos\varphi)$	0,975	1,08	1,364	1,89	2,29	-10,482	20,631	-11,149	-1,322	2,889
						C_4	C_3	C_2	C_1	C_0
$A_1 = f_1(\cos\varphi)$	0,53	0,50	0,41	0,16	0,065	21,885	-46,53	33,79	-8,801	0,811
						D_4	D_3	D_2	D_1	D_0
$A_2 = f_2(\cos\varphi)$	-0,87	-0,91	-0,99	-1,055	-1,205	-15,402	34,185	-27,444	9,8	-2,339
						E_4	E_3	E_2	E_1	E_0
$A_3 = f_3(\cos\varphi)$	0,205	0,22	0,249	0,282	0,334	3,521	-8,013	6,685	-2,577	0,648

$$\begin{cases} B_4 \cdot 0,79^4 + B_3 \cdot 0,79^3 + B_2 \cdot 0,79^2 + B_1 \cdot 0,79 + B_0 = 0,975; \\ B_4 \cdot 0,68^4 + B_3 \cdot 0,68^3 + B_2 \cdot 0,68^2 + B_1 \cdot 0,68 + B_0 = 1,08; \\ B_4 \cdot 0,50^4 + B_3 \cdot 0,50^3 + B_2 \cdot 0,50^2 + B_1 \cdot 0,50 + B_0 = 1,364; \\ B_4 \cdot 0,32^4 + B_3 \cdot 0,32^3 + B_2 \cdot 0,32^2 + B_1 \cdot 0,32 + B_0 = 1,89; \\ B_4 \cdot 0,21^4 + B_3 \cdot 0,21^3 + B_2 \cdot 0,21^2 + B_1 \cdot 0,21 + B_0 = 2,29. \end{cases} \quad (6.36)$$

$$\begin{cases} C_4 \cdot 0,79^4 + C_3 \cdot 0,79^3 + C_2 \cdot 0,79^2 + C_1 \cdot 0,79 + C_0 = 0,53; \\ C_4 \cdot 0,68^4 + C_3 \cdot 0,68^3 + C_2 \cdot 0,68^2 + C_1 \cdot 0,68 + C_0 = 0,50; \\ C_4 \cdot 0,50^4 + C_3 \cdot 0,50^3 + C_2 \cdot 0,50^2 + C_1 \cdot 0,50 + C_0 = 0,41; \\ C_4 \cdot 0,32^4 + C_3 \cdot 0,32^3 + C_2 \cdot 0,32^2 + C_1 \cdot 0,32 + C_0 = 0,16; \\ C_4 \cdot 0,21^4 + C_3 \cdot 0,21^3 + C_2 \cdot 0,21^2 + C_1 \cdot 0,21 + C_0 = 0,065. \end{cases} \quad (6.37)$$

$$\begin{cases} D_4 \cdot 0,79^4 + D_3 \cdot 0,79^3 + D_2 \cdot 0,79^2 + D_1 \cdot 0,79 + D_0 = -0,87; \\ D_4 \cdot 0,68^4 + D_3 \cdot 0,68^3 + D_2 \cdot 0,68^2 + D_1 \cdot 0,68 + D_0 = -0,91; \\ D_4 \cdot 0,50^4 + D_3 \cdot 0,50^3 + D_2 \cdot 0,50^2 + D_1 \cdot 0,50 + D_0 = -0,99; \\ D_4 \cdot 0,32^4 + D_3 \cdot 0,32^3 + D_2 \cdot 0,32^2 + D_1 \cdot 0,32 + D_0 = -1,055; \\ D_4 \cdot 0,21^4 + D_3 \cdot 0,21^3 + D_2 \cdot 0,21^2 + D_1 \cdot 0,21 + D_0 = -1,205. \end{cases} \quad (6.38)$$

$$\begin{cases} E_4 \cdot 0,79^4 + E_3 \cdot 0,79^3 + E_2 \cdot 0,79^2 + E_1 \cdot 0,79 + E_0 = 0,205; \\ E_4 \cdot 0,68^4 + E_3 \cdot 0,68^3 + E_2 \cdot 0,68^2 + E_1 \cdot 0,68 + E_0 = 0,22; \\ E_4 \cdot 0,50^4 + E_3 \cdot 0,50^3 + E_2 \cdot 0,50^2 + E_1 \cdot 0,50 + E_0 = 0,249; \\ E_4 \cdot 0,32^4 + E_3 \cdot 0,32^3 + E_2 \cdot 0,32^2 + E_1 \cdot 0,32 + E_0 = 0,282; \\ E_4 \cdot 0,21^4 + E_3 \cdot 0,21^3 + E_2 \cdot 0,21^2 + E_1 \cdot 0,21 + E_0 = 0,334. \end{cases} \quad (6.39)$$

Графики аппроксимирующих функций коэффициентов $A_0 = f_0(\cos\varphi)$, $A_1 = f_1(\cos\varphi)$, $A_2 = f_2(\cos\varphi)$, $A_3 = f_3(\cos\varphi)$ показаны на рисунке 6.6 сплошными линиями.

Таким образом, получаем систему уравнений для расчета приближенного значения коэффициента k_S регулирования полной мощности, потребляемой сварочной машиной из сети [194, 200]:

$$\begin{cases} k_{S,A} = f(\alpha, \cos\varphi) = A_3 \cdot \alpha^3 + A_2 \cdot \alpha^2 + A_1 \cdot \alpha + A_0; \\ A_0 = f_0(\cos\varphi) = -10,842\cos^4\varphi + 20,631\cos^3\varphi - 11,149\cos^2\varphi - \\ - 1,322\cos\varphi + 2,889; \\ A_1 = f_1(\cos\varphi) = 21,885\cos^4\varphi - 46,53\cos^3\varphi + 33,79\cos^2\varphi - \\ - 8,801\cos\varphi + 0,811; \\ A_2 = f_2(\cos\varphi) = -15,402\cos^4\varphi + 34,185\cos^3\varphi - 27,444\cos^2\varphi + \\ + 9,8\cos\varphi - 2,339; \\ A_3 = f_3(\cos\varphi) = 3,521\cos^4\varphi - 8,013\cos^3\varphi + 6,685\cos^2\varphi - \\ - 2,577\cos\varphi + 0,648. \end{cases} \quad (6.40)$$

Относительная погрешность вычислений определялась как

$$\omega\% = \frac{k_{S,A}(\alpha, \cos\varphi) - k_S(\alpha, \cos\varphi)}{k_S(\alpha, \cos\varphi)} \cdot 100\%, \quad (6.41)$$

где коэффициент $k_{S,A}(\alpha, \cos\varphi)$ вычислялся по аппроксимирующей зависимости (6.40), а $k_S(\alpha, \cos\varphi)$ – согласно (6.29) (таблица 6.9).

Для области определения коэффициента $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,8$ и угла регулирования $\alpha = 60 \dots 120^\circ$ относительная погрешность аппроксимации по формуле (6.41) составляет не более 3,3 %.



Таблица 6.9 – Относительная погрешность аппроксимации $\omega\%$ коэффициента k_S регулирования полной мощности

cosφ	Относительная погрешность аппроксимации $\omega\%$						
	Угол открытия тиристорov α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
0,2	–	–	0,842	0,998	0,702	0,336	3,3
0,3	–	–	0,013	0,152	0,276	0,539	2,636
0,4	–	0,307	0,134	0,011	0,223	0,188	2,374
0,5	0,601	0,739	0,626	0,634	0,391	0,012	2,565
0,6	0,705	0,876	0,805	0,736	0,402	0,214	3,043
0,7	0,288	0,413	0,46	0,281	0,07	0,541	3,143
0,8	0,471	0,456	0,478	0,475	0,462	0,369	0,946

6.3 Расчетное определение коэффициента мощности контактной сварочной машины при автоматическом регулировании

Значение коэффициента мощности $\cos\phi$ контактной сварочной машины можно определить непосредственно по осциллограммам как сдвиг фаз напряжения и тока только при однофазном включении тока. В этом случае требуется производить сварку на максимальном токе при минимальном времени, что ведет к нарушению технологического процесса. Использование короткого замыкания для определения $\cos\phi$ связано со значительной погрешностью, так как не учитывается влияние сопротивления свариваемых деталей r_{Σ} на изменение $\cos\phi$. Поэтому при построении систем автоматического управления возникает необходимость применения высокопроизводительных вычислительных средств, позволяющих отслеживать изменение $\cos\phi$ в реальном времени непосредственно по осциллограммам фактического режима сварки [196–200].

Графическое решение уравнения (6.18) в программной среде Mathcad для дискретных значений длительности λ включенного состояния тиристорov и угла регулирования α позволяет в каждом полупериоде сетевого напряжения однозначно определять величину $\cos\phi$ (таблица 6.10). При этом время расчета значения $\cos\phi$ должно составлять около 0,01 с.

Функция $\cos\phi = f(\lambda, \alpha)$ может быть представлена в виде графиков (рисунок 6.7), которые позволяют предложить способы ее аппроксимации [54, 200].

Зададим область значений искомой функции $\cos\phi = 0,2 \dots 0,8$. На заданной области значений функция $\cos\phi = f(\lambda, \alpha)$ может быть с необходимой точностью аппроксимирована многочленами второй степени вида

$$\cos\varphi = A_2\lambda^2 + A_1\lambda + A_0, \quad (6.42)$$

где A_2 , A_1 и A_0 – коэффициенты, зависящие от принятого значения α .

Таблица 6.10 – Значения коэффициента мощности $\cos\varphi$ для дискретных значений угла включения α и длительности включенного состояния λ тиристоров

Длительность включенного состояния тиристоров λ	Коэффициент мощности $\cos\varphi$ контактной сварочной машины						
	Угол включения тиристоров α , град						
	60	70	80	90	100	110	120
60	–	–	–	–	–	–	1
70	–	–	–	–	–	1	0,9846
80	–	–	–	–	1	0,9847	0,9292
90	–	–	–	1	0,9848	0,9339	0,7966
100	–	–	1	0,9848	0,9365	0,8261	0,5564
110	–	1	0,9848	0,9379	0,8421	0,6438	0,2586
120	1	0,9848	0,9387	0,8515	0,6918	0,4104	0
130	0,9848	0,9392	0,8573	0,7204	0,5003	0,1829	–
140	0,9394	0,8609	0,7384	0,5559	0,3039	0	–
150	0,8632	0,75	0,5918	0,3838	0,1336	–	–
160	0,7577	0,6157	0,4376	0,2282	0	–	–
170	0,6318	0,4745	0,2948	0,1001	–	–	–

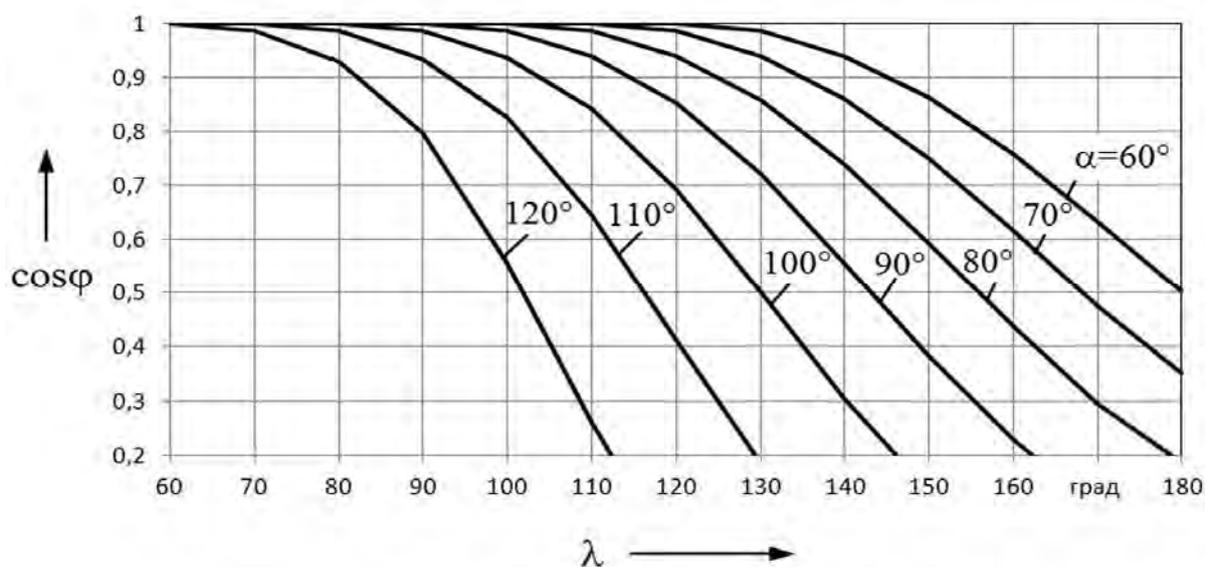


Рисунок 6.7 – Значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ в зависимости от длительности включенного состояния тиристоров λ при заданном значении угла α

При этом значения коэффициентов A_2 , A_1 и A_0 в зависимости от заданного α могут быть представлены в виде функций $A_2(\alpha)$, $A_1(\alpha)$ и $A_0(\alpha)$, которые являются решениями системы уравнений

$$\begin{cases} \cos\varphi_0 = A_2(\alpha)\lambda^2(\alpha, \cos\varphi_0) + A_1(\alpha)\lambda(\alpha, \cos\varphi_0) + A_0(\alpha); \\ \cos\varphi_1 = A_2(\alpha)\lambda^2(\alpha, \cos\varphi_1) + A_1(\alpha)\lambda(\alpha, \cos\varphi_1) + A_0(\alpha); \\ \cos\varphi_2 = A_2(\alpha)\lambda^2(\alpha, \cos\varphi_2) + A_1(\alpha)\lambda(\alpha, \cos\varphi_2) + A_0(\alpha), \end{cases} \quad (6.43)$$

где $\cos\varphi_0, \cos\varphi_1, \cos\varphi_2$ – заданные значения узлов интерполяции;

$\lambda(\alpha, \cos\varphi_0), \lambda(\alpha, \cos\varphi_1), \lambda(\alpha, \cos\varphi_2)$ – результаты графического решения уравнения (6.18) для заданных значений α и $\cos\varphi$.

Для заданного диапазона изменений коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,8$ (см. рисунок 6.7) определим узлы интерполяции $\cos\varphi_0, \cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$ исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [54, 202, 203]

$$\cos\varphi_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \quad (6.44)$$

где a, b – границы отрезка интерполяции $[a; b] = [0,2; 0,8]$;

n – максимальный номер узла интерполяции, $n = 2$;

m – номер узла интерполяции, $m = 0, 1, 2$.

Результаты расчета (6.44) представлены в таблице 6.11. Для выбранных узлов интерполяции $\cos\varphi_0, \cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$ решаем семь систем уравнений (6.43) для заданных значений $\alpha = [60; 70; 80; 90; 100; 110; 120^\circ]$ и определяем значения коэффициентов A_2, A_1 и A_0 . Значения функций $\lambda(\alpha, \cos\varphi_0), \lambda(\alpha, \cos\varphi_1)$ и $\lambda(\alpha, \cos\varphi_2)$ вычисляем по формуле (6.18). Результаты расчета сводим в таблицу 6.12.

Таблица 6.11 – Определение границ отрезка интерполяции $[a, b]$ и узлов интерполяции $\cos\varphi_0, \cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$ для заданных значений $\alpha = 60 \dots 120^\circ$

α , град	a	b	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_0$
60...120	$\cos\varphi = 0,2$	$\cos\varphi = 0,8$	0,7598	0,5	0,2402

Семейство аппроксимирующих функций $\cos\varphi = f(\lambda, \alpha)$ для различных значений α (рисунок 6.8) выглядит следующим образом (таблица 6.13).



Таблица 6.12 – Вычисление семейства аппроксимирующих функций $\lambda(\alpha, \cos\varphi_2)$ для вычисления коэффициента мощности $\cos\varphi = f(\lambda, \alpha)$

α , град	$\lambda(\alpha, \cos\varphi_2)$	$\lambda(\alpha, \cos\varphi_1)$	$\lambda(\alpha, \cos\varphi_0)$	A_2	A_1	A_0
60	2,7894	3,1416	3,5384	0,1107	-1,3942	3,7874
70	2,6042	2,9352	3,2951	0,0912	-1,2902	3,5011
80	2,4153	2,7214	3,0415	0,0593	-1,1532	3,1994
90	2,2219	2,4996	2,7779	0,0036	-0,9527	2,8586
100	2,023	2,2692	2,5047	-0,0995	-0,628	2,4376
110	1,8173	2,0293	2,2223	-0,2979	-0,0796	1,8883
120	1,6035	1,7792	1,9309	-0,7145	0,9383	1,0923

Таблица 6.13 – Семейство аппроксимирующих функций $\cos\varphi = f(\lambda, \alpha)$

α , град	$\cos\varphi_n(\lambda, \alpha)$
60	$\left\{ \begin{array}{l} \cos\varphi_1(\lambda, \alpha) = 0,1107\lambda^2 - 1,3942\lambda + 3,7874; \\ \cos\varphi_2(\lambda, \alpha) = 0,0912\lambda^2 - 1,2902\lambda + 3,5011; \\ \cos\varphi_3(\lambda, \alpha) = 0,0593\lambda^2 - 1,1532\lambda + 3,1994; \\ \cos\varphi_4(\lambda, \alpha) = 0,0036\lambda^2 - 0,9527\lambda + 2,8586; \\ \cos\varphi_5(\lambda, \alpha) = -0,0995\lambda^2 - 0,628\lambda + 2,4376; \\ \cos\varphi_6(\lambda, \alpha) = -0,2979\lambda^2 - 0,0796\lambda + 1,8883; \\ \cos\varphi_7(\lambda, \alpha) = -0,7145\lambda^2 + 0,9383\lambda + 1,0923 \end{array} \right.$
70	
80	
90	
100	
110	
120	

Если представить значения коэффициентов A_2 , A_1 и A_0 в виде графиков (показаны на рисунке 6.9 штриховыми линиями), то становится возможной аппроксимация этих графиков многочленами четвертой степени:

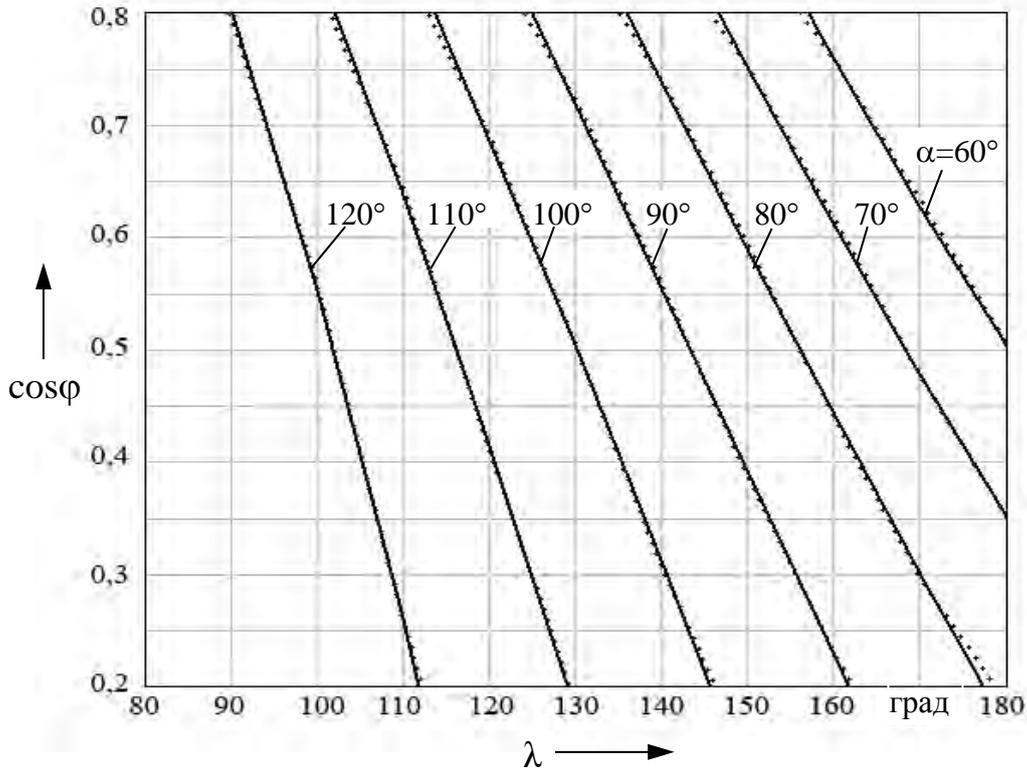
$$\begin{cases} A_0 = f_0(\alpha) = B_4\alpha^4 + B_3\alpha^3 + B_2\alpha^2 + B_1\alpha + B_0; \\ A_1 = f_1(\alpha) = C_4\alpha^4 + C_3\alpha^3 + C_2\alpha^2 + C_1\alpha + C_0; \\ A_2 = f_2(\alpha) = D_4\alpha^4 + D_3\alpha^3 + D_2\alpha^2 + D_1\alpha + D_0. \end{cases} \quad (6.45)$$

На отрезке $\alpha = 60 \dots 120^\circ$ узлы интерполяции зададим исходя из условия минимизации погрешности интерполяции [54, 202, 203]

$$a_m = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos\left(\frac{2m+1}{2n+2}\pi\right), \quad (6.46)$$



где n – максимальный номер узла интерполяции, $n = 4$;
 m – номер узла интерполяции, $m = 0, 1, 2, 3, 4$.



..... построенные по расчетным значениям (см. таблицу 6.10);
 ————— полученные по аппроксимирующим зависимостям (см. таблицу 6.13)

Рисунок 6.8 – Графики функций $\cos \varphi = f(\lambda, \alpha)$

Решая уравнение (6.46), для $m = 0, 1, 2, 3, 4$ получим узлы интерполяции в градусах $\alpha_m = [118,5; 107,6; 90; 72,4; 61,5^\circ]$ или при переводе в радианы $\alpha_m \text{ рад} = [2,0682; 1,878; 1,5708; 1,2636; 1,0734]$. С учетом выбранных узлов интерполяции из уравнений (6.45) запишем три системы уравнений и рассчитаем искомые коэффициенты B_0 – B_4 , C_0 – C_4 и D_0 – D_4 (таблица 6.14).

Графики аппроксимирующих функций для коэффициентов $A_0 = f_0(\alpha)$, $A_1 = f_1(\alpha)$ и $A_2 = f_2(\alpha)$ показаны на рисунке 6.9 сплошными линиями.

$$\begin{cases} B_4 \cdot 2,0682^4 + B_3 \cdot 2,0682^3 + B_2 \cdot 2,0682^2 + B_1 \cdot 2,0682 + B_0 = 1,21; \\ B_4 \cdot 1,878^4 + B_3 \cdot 1,878^3 + B_2 \cdot 1,878^2 + B_1 \cdot 1,878 + B_0 = 2,05; \\ B_4 \cdot 1,5708^4 + B_3 \cdot 1,5708^3 + B_2 \cdot 1,5708^2 + B_1 \cdot 1,5708 + B_0 = 2,86; \\ B_4 \cdot 1,2636^4 + B_3 \cdot 1,2636^3 + B_2 \cdot 1,2636^2 + B_1 \cdot 1,2636 + B_0 = 3,45; \\ B_4 \cdot 1,0734^4 + B_3 \cdot 1,0734^3 + B_2 \cdot 1,0734^2 + B_1 \cdot 1,0734 + B_0 = 3,75. \end{cases} \quad (6.47)$$

$$\begin{cases} C_4 \cdot 2,0682^4 + C_3 \cdot 2,0682^3 + C_2 \cdot 2,0682 + C_1 \cdot 2,0682 + C_0 = 0,76; \\ C_4 \cdot 1,878^4 + C_3 \cdot 1,878^3 + C_2 \cdot 1,878^2 + C_1 \cdot 1,878 + C_0 = -0,24; \\ C_4 \cdot 1,5708^4 + C_3 \cdot 1,5708^3 + C_2 \cdot 1,5708^2 + C_1 \cdot 1,5708 + C_0 = -0,95; \\ C_4 \cdot 1,2636^4 + C_3 \cdot 1,2636^3 + C_2 \cdot 1,2636^2 + C_1 \cdot 1,2636 + C_0 = -1,26; \\ C_4 \cdot 1,0734^4 + C_3 \cdot 1,0734^3 + C_2 \cdot 1,0734^2 + C_1 \cdot 1,0734 + C_0 = -1,38. \end{cases} \quad (6.48)$$

$$\begin{cases} D_4 \cdot 2,0682^4 + D_3 \cdot 2,0682^3 + D_2 \cdot 2,0682 + D_1 \cdot 2,0682 + D_0 = -0,64; \\ D_4 \cdot 1,878^4 + D_3 \cdot 1,878^3 + D_2 \cdot 1,878^2 + D_1 \cdot 1,878 + D_0 = -0,238; \\ D_4 \cdot 1,5708^4 + D_3 \cdot 1,5708^3 + D_2 \cdot 1,5708^2 + D_1 \cdot 1,5708 + D_0 = 0,002; \\ D_4 \cdot 1,2636^4 + D_3 \cdot 1,2636^3 + D_2 \cdot 1,2636^2 + D_1 \cdot 1,2636 + D_0 = 0,087; \\ D_4 \cdot 1,0734^4 + D_3 \cdot 1,0734^3 + D_2 \cdot 1,0734^2 + D_1 \cdot 1,0734 + D_0 = 0,108. \end{cases} \quad (6.49)$$

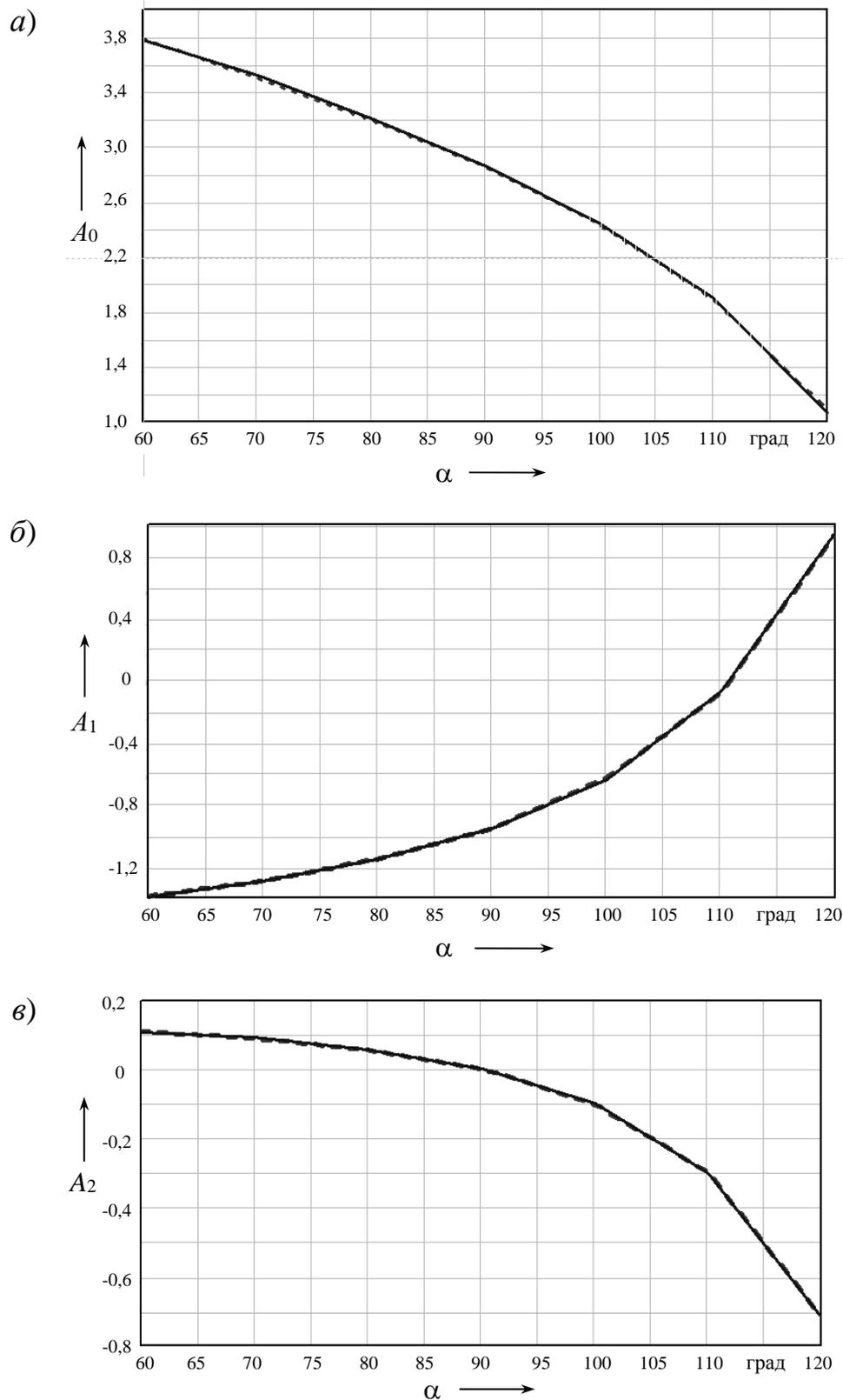
Таблица 6.14 – Расчет искомых коэффициентов B_0 – B_4 , C_0 – C_4 и D_0 – D_4

Значение функций	Узел интерполяции α , град/рад					Значение коэффициентов				
	$\frac{118,5}{2,0682}$	$\frac{107,6}{1,878}$	$\frac{90}{1,5708}$	$\frac{72,4}{1,2636}$	$\frac{61,5}{1,0734}$					
						B_4	B_3	B_2	B_1	B_0
$A_0 = f_0(\alpha)$	1,21	2,05	2,86	3,45	3,75	-2,4199	13,4102	-28,306	25,0677	-3,9166
						C_4	C_3	C_2	C_1	C_0
$A_1 = f_1(\alpha)$	0,76	-0,24	-0,95	-1,26	-1,38	3,0552	-15,988	31,9418	-28,0098	7,6002
						D_4	D_3	D_2	D_1	D_0
$A_2 = f_2(\alpha)$	-0,64	-0,238	0,002	0,087	0,108	-1,7121	9,3009	-19,142	17,4411	-5,7881

В результате получаем систему уравнений для расчета приближенного значения коэффициента мощности $\cos\varphi$ в зависимости от длительности включенного состояния тиристоров λ и угла включения α . Абсолютная погрешность вычисления $\cos\varphi$ составила не более 0,05 [200].

$$\begin{cases} \cos\varphi = f(\lambda, \alpha) = A_2 \cdot \lambda^2 + A_1 \cdot \lambda + A_0; \\ A_0 = f_0(\alpha) = -2,4199\alpha^4 + 13,4102\alpha^3 - 28,306\alpha^2 + 25,0677\alpha - 3,9166; \\ A_1 = f_1(\alpha) = 3,0552\alpha^4 - 15,988\alpha^3 + 31,9418\alpha^2 - 28,0098\alpha + 7,6002; \\ A_2 = f_2(\alpha) = -1,7121\alpha^4 + 9,3009\alpha^3 - 19,142\alpha^2 + 17,4411\alpha - 5,7881. \end{cases} \quad (6.50)$$





----- построенные по расчетным значениям (см. таблицу 6.10);
 ————— полученные по аппроксимирующим зависимостям (6.50)

Рисунок 6.9 – Графики функций для коэффициентов: а – $A_0 = f_0(\alpha)$; б – $A_1 = f_1(\alpha)$;
 в – $A_2 = f_2(\alpha)$

6.4 Расчетное определение коэффициента регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону

Для определения коэффициента регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону k_p используем треугольник сопротивлений контактной сварочной машины (рисунок 6.10).

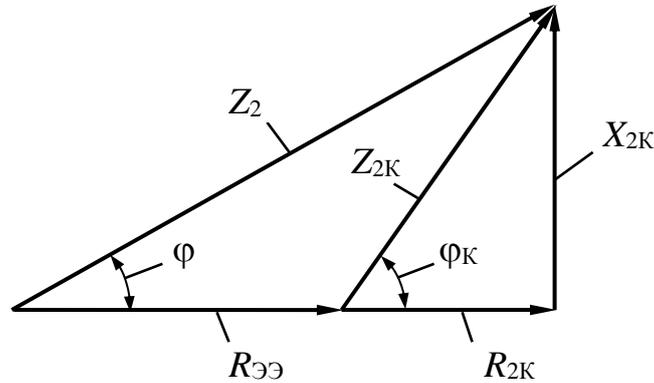


Рисунок 6.10 – Треугольник сопротивлений контактных сварочных машин

Величина $\cos\varphi$ может быть определена из треугольника сопротивлений как косинус угла между векторами активного $(R_{2К} + R_{ЭЭ})$ и полного Z_2 сопротивлений контактной машины в режиме сварки. Из треугольника сопротивлений и формулы (6.7) получаем соотношения

$$R_{ЭЭ} + R_{2К} = Z_2 \cos \varphi; \quad (6.51)$$

$$I_2 (R_{ЭЭ} + R_{2К}) = U_{20} \cos \varphi. \quad (6.52)$$

Для сварочного тока I_2 и полнофазного тока $I_{2П}$ выражение (6.52) можно записать следующим образом:

$$U_{ЭЭ} + I_2 R_{2К} = U_{20} \cos \varphi; \quad (6.53)$$

$$U_{ЭЭП} + I_{2П} R_{2К} = U_{20П} \cos \varphi. \quad (6.54)$$

Помножим выражения (6.53) и (6.54) соответственно на сварочные токи I_2 и $I_{2П}$ и получим выражения для мощности

$$I_2 U_{ЭЭ} + I_2^2 R_{2К} = U_{20} I_2 \cos \varphi; \quad (6.55)$$

$$I_{2П} U_{ЭЭП} + I_{2П}^2 R_{2К} = U_{20П} I_{2П} \cos \varphi, \quad (6.56)$$



или

$$P_2 + I_2^2 R_{2К} = S_1 \cos \varphi; \quad (6.57)$$

$$P_{2П} + I_{2П}^2 R_{2К} = S_{1П} \cos \varphi, \quad (6.58)$$

где $P_{2П}$ – мощность тепловложения в межэлектродную зону при полнофазном включении, $P_{2П} = I_{2П} \cdot U_{2П}$.

Коэффициент регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону определяется следующим образом:

$$k_P = \frac{P_2}{P_{2П}} = \frac{I_2^2 R_{ЭЭ}}{I_{2П}^2 R_{ЭЭП}} = k_I^2 \frac{R_{ЭЭ}}{R_{ЭЭП}}, \quad (6.59)$$

где k_I – коэффициент регулирования тока (см. формулу (6.22));

$R_{ЭЭП}$ – сопротивление зоны электрод–электрод при полнофазном включении тока.

Разделим выражение (6.57) на (6.58) и получим выражение для определения коэффициента регулирования полной мощности

$$k_S = \frac{S_1}{S_{1П}} = \frac{P_2 + I_2^2 R_{2К}}{P_{2П} + I_{2П}^2 R_{2К}}. \quad (6.60)$$

Разделим числитель и знаменатель дроби в выражении (6.60) на $P_{2П}$ и преобразуем результат:

$$k_S = \frac{S_1}{S_{1П}} = \frac{(P_2 + I_2^2 R_{2К}) / P_{2П}}{(P_{2П} + I_{2П}^2 R_{2К}) / P_{2П}} = \frac{\frac{P_2}{P_{2П}} + \frac{I_2^2 R_{2К}}{P_{2П}}}{\frac{P_{2П}}{P_{2П}} + \frac{I_{2П}^2 R_{2К}}{P_{2П}}} = \frac{k_P + k_I^2 \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭП}}}{1 + \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭП}}}. \quad (6.61)$$

Выразим из (6.59) k_I^2 и подставим в (6.61):

$$k_S = \frac{S_1}{S_{1П}} = \frac{k_P + \frac{k_P R_{ЭЭП}}{R_{ЭЭ}} \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭП}}}{1 + \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭП}}} = \frac{k_P \left(1 + \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭ}} \right)}{1 + \frac{R_{2К}}{R_{ЭЭП}}}. \quad (6.62)$$



Значение $R_{ЭЭП}$ является гипотетической величиной – это предполагаемое значение сопротивления зоны электрод–электрод, которое бы установилось при полнофазном включении тока в последующем периоде сетевого напряжения. Сопротивление $R_{ЭЭП}$ определить в ходе процесса сварки невозможно. Определить точно можно только сопротивление $R_{ЭЭ}$ в предыдущем периоде протекания тока. При этом на начальном этапе сварки в течение 0,02...0,04 с (первые два периода протекания тока) наблюдается резкое снижение $R_{ЭЭ}$, в связи с чем в первые два периода сварочный ток должен устанавливаться минимальным при максимальном угле регулирования тиристоров α_{\max} . В конце второго периода сопротивление $R_{ЭЭ}$ практически стабилизируется, и скорость его изменения становится значительно меньше, что позволяет с большей степенью точности использовать это сопротивление для расчета мощности тепловложения P_2 в третьем периоде протекания тока. Таким образом, можно принять, что при дальнейшем протекании тока $R_{ЭЭП} \approx R_{ЭЭ}$. При этом из формулы (6.62) получаем, что **коэффициент регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону приблизительно равен коэффициенту регулирования мощности, потребляемой сварочной машиной из сети: $k_P \approx k_S$.**

6.5 Определение угла открытия тиристоров при автоматическом регулировании мощности тепловложения в зону сварки

При настройке контактной машины на оптимальные режимы сварки необходимо правильно задавать ступень сварочного трансформатора (вторичное напряжение U_{20} холостого хода) и угол α открытия сварочных тиристоров.

Перед началом сварки нужно определить коэффициент трансформации установленной ступени трансформатора, действующее значение напряжения холостого хода на вторичной обмотке трансформатора при его полнофазном включении $U_{20п}$. Определение необходимой ступени трансформатора, обеспечивающей требуемое вторичное напряжение U_{20} , проводят при помощи вольт-амперной или нагрузочной характеристики контактной сварочной машины.

В корректирующей системе автоматического регулирования мощности тепловложения выбор угла открытия тиристоров α_{n+1} в следующем ($n + 1$)-м периоде зависит от текущих измеренных параметров режима сварки в текущем n -м периоде и циклограммы мощности тепловложения $P_{23АД}$, заданной в табличном виде с интервалом 10 мс, равным полупериоду сетевого напряжения.

Время измерения $\tau_{измл}$ параметров режима, характеризующих процесс рельефной сварки, таких как напряжение между электродами $U_{ЭЭ}$, вторичный



ток I_2 , мощность тепловложения P_2 и коэффициент мощности сварочной машины $\cos\varphi$, совпадает с продолжительностью включения тиристоров λ и производится в течение каждого полупериода сетевого напряжения (рисунок 6.11). В начале протекания сварочного тока i_2 в n -м положительном полупериоде задается напряжение управления U_{yn} и вводится угол включения тиристоров α_n , при этом за время $\tau_{изм\ n}$ происходит измерение заданных параметров, далее производится вычисление напряжения управления U_{yn+1} и угла включения тиристоров α_{n+1} . Однако в течение следующего $(n + 1)$ -го отрицательного полупериода сохраняется угол включения тиристоров α_n . Угол включения α_{n+1} начинает действовать только в $(n + 2)$ -м положительном полупериоде. Следовательно, коррекция режима сварки начинает действовать через один полупериод: например, после времени измерения $\tau_{изм\ n+1}$ напряжения управления U_{yn+2} меняет угол включения α_{n+2} только в $(n + 3)$ -м отрицательном полупериоде. Таким образом, время расчета напряжения управления U_y весьма ограничено и составляет менее 0,01 с [194, 200].

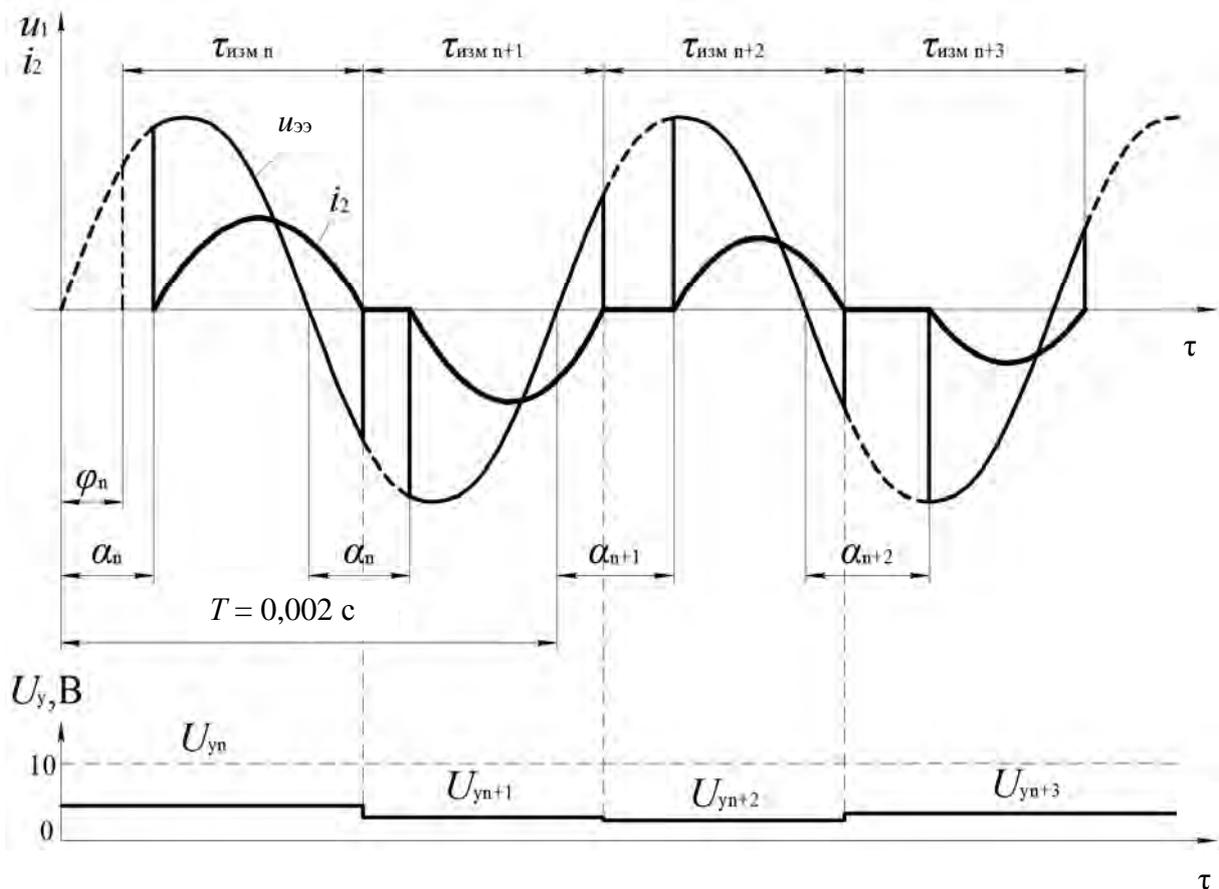


Рисунок 6.11 – Измерение параметров и выбор угла открытия тиристоров в корректирующей системе автоматического регулирования мощности тепловложения

Для вычисления угла включения тиристоров α последовательно определяется ряд параметров [200]:

1) мощность тепловложения $P_2 = U_{ЭЭ} \cdot I_2$ и сопротивление участка электрод–электрод $R_{ЭЭ} = U_{ЭЭ} / I_2$ в текущем положительном полупериоде n -го периода сетевого напряжения;

2) коэффициент мощности сварочной машины $\cos\varphi_n = f(\lambda_n, \alpha_n)$ в зависимости от длительности включенного состояния тиристоров λ_n и угла включения α_n по аппроксимирующей зависимости (6.50);

3) коэффициент регулирования полной мощности $k_{S,An} = f(\alpha_n, \cos\varphi_n)$ по аппроксимирующей зависимости (6.40);

4) мощность тепловложения при полнофазном токе $P_{2\Pi} = P_2 / k_{S,An}$;

5) коэффициент регулирования мощности тепловложения $k_{P_{n+1}}$ в следующем периоде, равный коэффициенту регулирования полной мощности, $k_{P_{n+1}} = k_{S_{n+1}} = P_{23АД\ n+1} / P_{2\Pi}$, где $P_{23АД\ n+1}$ – значение мощности тепловложения для следующего периода по циклограмме задания мощности $P_{23АД}$;

б) угол управления тиристорами в следующем периоде α_{n+1} при известном коэффициенте $k_{S_{n+1}}$, для чего вначале с учетом коэффициента мощности $\cos\varphi_n$ вычисляются коэффициенты $A_0 = f_0(\cos\varphi_n)$, $A_1 = f_1(\cos\varphi_n)$, $A_2 = f_2(\cos\varphi_n)$, $A_3 = f_3(\cos\varphi_n)$ по формулам (6.40), а затем получается кубическое уравнение, которое необходимо решить относительно α_{n+1} :

$$A_3 \cdot \alpha_{n+1}^3 + A_2 \cdot \alpha_{n+1}^2 + A_1 \cdot \alpha_{n+1} + A_0 - k_{S_{n+1}} = 0. \quad (6.63)$$

Для решения уравнения (6.63) произведем подстановку $\alpha_{n+1} = t / \sqrt[3]{A_3}$. Тогда кубическое уравнение примет следующий вид:

$$t^3 + B \cdot t^2 + C \cdot t + D = 0, \quad (6.64)$$

где

$$B = \frac{A_2}{\left(\sqrt[3]{A_3}\right)^2};$$

$$C = \frac{A_1}{\sqrt[3]{A_3}};$$

$$D = A_0 - k_{S_{n+1}}.$$

При замене в выражении (6.64) переменной t на новую переменную y по формуле $t = y - B/3$ уравнение станет вида

$$y^3 + p \cdot y + q = 0, \quad (6.65)$$



где

$$p = C - \frac{B^2}{3};$$

$$q = \frac{2B^3}{27} - \frac{C \cdot B}{3} + D.$$

Определим параметр Q :

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 - \left(\frac{q}{2}\right)^2. \quad (6.66)$$

Если все коэффициенты кубического уравнения вещественны, то и Q вещественно, и по его знаку можно определить тип корней:

- 1) $Q > 0$ – один вещественный корень и два сопряженных комплексных;
- 2) $Q = 0$ – один однократный вещественный корень и один двукратный или если $p = q = 0$, то один трёхкратный вещественный корень;
- 3) $Q < 0$ – три вещественных корня.

По формуле Кардано корни кубического уравнения

$$y_1 = \alpha_1 + \beta_1;$$

$$y_{2,3} = -\frac{\alpha_1 + \beta_1}{2} \mp i \frac{\alpha_1 - \beta_1}{2} \sqrt{3}, \quad (6.67)$$

где

$$\alpha_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}};$$

$$\beta_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}.$$

Так как в рассматриваемом случае всегда $Q < 0$, то все три корня уравнения получаются вещественными. Из трех корней искомое решение дает третий корень

$$y_3 = -\frac{\alpha_1 + \beta_1}{2} - i \frac{\alpha_1 - \beta_1}{2} \sqrt{3}. \quad (6.68)$$



Для удобства расчета нужно выделить из этого выражения вещественную часть, которая и будет искомым решением. Преобразуем α_1 и β_1 в показательную форму с учетом того, что $Q < 0$.

$$\alpha_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + i \cdot \sqrt{-\frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}}; \quad \beta_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - i \cdot \sqrt{-\frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}}. \quad (6.69)$$

Показательная форма комплексного числа имеет следующий вид:

$$z = re^{i\theta},$$

где r – модуль комплексного числа;

θ – аргумент комплексного числа.

Выразим модули и аргументы выражений α_1 и β_1 .

$$r = \sqrt[3]{\sqrt{\left(-\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{-\frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}\right)^2}} = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{q^2}{4} - \frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}} = \sqrt[6]{-\frac{p^3}{27}} = \sqrt{-\frac{p}{3}}. \quad (6.70)$$

Если $q > 0$,

$$\theta = \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{-\frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}}{-\frac{q}{2}} \right).$$

Если $q < 0$,

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{-\frac{q^2}{4} - \frac{p^3}{27}}}{-\frac{q}{2}} \right).$$

Если $q = 0$,

$$\theta = \frac{\pi}{2}.$$

В результате получаем



$$\alpha_1 = \sqrt{-\frac{p}{3}} e^{i\frac{\theta}{3}}; \quad \beta_1 = \sqrt{-\frac{p}{3}} e^{-i\frac{\theta}{3}}. \quad (6.71)$$

Для дальнейшего преобразования используем известные равенства

$$\cos \psi = \frac{e^{i\psi} + e^{-i\psi}}{2}; \quad \sin \psi = \frac{e^{i\psi} - e^{-i\psi}}{2i}. \quad (6.72)$$

Преобразуем выражения из формулы (6.68):

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1 + \beta_1}{2} &= \frac{\sqrt{-\frac{p}{3}} e^{i\frac{\theta}{3}} + \sqrt{-\frac{p}{3}} e^{-i\frac{\theta}{3}}}{2} = \frac{\sqrt{-\frac{p}{3}} \left(e^{i\frac{\theta}{3}} + e^{-i\frac{\theta}{3}} \right)}{2} = \\ &= -\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\theta}{3} - i \frac{\alpha_1 - \beta_1}{2} \sqrt{3} = -i \frac{\sqrt{-\frac{p}{3}} e^{i\frac{\theta}{3}} - \sqrt{-\frac{p}{3}} e^{-i\frac{\theta}{3}}}{2} \sqrt{3} = -i \frac{\sqrt{-\frac{p}{3}} \left(e^{i\frac{\theta}{3}} - e^{-i\frac{\theta}{3}} \right)}{2} \sqrt{3} = \\ &= -i \sqrt{-\frac{p}{3}} \sqrt{3} \cdot i \cdot \sin \frac{\theta}{3} = \sqrt{-\frac{p}{3}} \sqrt{3} \sin \frac{\theta}{3}. \end{aligned}$$

В результате получаем решение кубического уравнения (6.68)

$$\begin{aligned} y_3 &= -\frac{\alpha_1 + \beta_1}{2} - i \frac{\alpha_1 - \beta_1}{2} \sqrt{3} = -\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\theta}{3} + \sqrt{-\frac{p}{3}} \sqrt{3} \sin \frac{\theta}{3} = \\ &= \sqrt{-\frac{p}{3}} \left(\sqrt{3} \sin \frac{\theta}{3} - \cos \frac{\theta}{3} \right). \quad (6.73) \end{aligned}$$

Тогда окончательное выражение для угла регулирования α_{n+1} с учетом всех замен переменных в формулах (6.64) и (6.65) примет следующий вид:

$$\alpha_{n+1} = \frac{t}{\sqrt[3]{A_3}} = \frac{y_3 - \frac{B}{3}}{\sqrt[3]{A_3}} = \frac{y_3 - \frac{A_2}{3(\sqrt[3]{A_3})^2}}{\sqrt[3]{A_3}} = \frac{\sqrt{-\frac{p}{3}} \left(\sqrt{3} \sin \frac{\theta}{3} - \cos \frac{\theta}{3} \right)}{\sqrt[3]{A_3}} - \frac{A_2}{3A_3}. \quad (6.74)$$



Задание задержки включения тиристорov α_{n+1} осуществляется с помощью аналогового сигнала управления с заданным диапазоном, например, $U_y = 0 \dots 10$ В. Задание угла включения α_{n+1} может произойти только через один полупериод сетевого напряжения, так как время расчета составляет около 0,01 с.

Выводы

Разработан математический аппарат, позволяющий в процессе сварки в режиме реального времени рассчитывать коэффициент регулирования мощности тепловложения k_{Pn} в межэлектродную зону в текущем полупериоде сетевого напряжения. Вычисление коэффициента регулирования мощности k_{Pn+1} и угла открытия тиристорov α_{n+1} в следующем полупериоде сетевого напряжения базируется на измерении действующих значений вторичного тока I_2 и напряжения между электродами $U_{\text{ЭЭ}}$, длительности включенного состояния тиристорov λ_n в течение предыдущего полупериода и определении по аппроксимирующей зависимости коэффициента мощности $\cos\varphi$ контактной сварочной машины.



7 Разработка компьютерной системы управления процессом контактной сварки

7.1 Использование компьютерного управления для регулирования процесса контактной точечной и рельефной сварки

Современные микропроцессорные регуляторы контактной сварки позволяют осуществлять управления контактными сварочными машинами с обратной связью по току, напряжению и другим параметрам. Основной задачей микропроцессора в таких системах является расчет коэффициента мощности сварочной машины по измеренному току и задание задержки включения тиристоров таким образом, чтобы стабилизировать действующее значение тока во вторичном контуре [204–206]. Данные системы, как правило, работают по жесткой программе и не обладают адаптивностью к характеру и величине возмущающего воздействия.

Компьютерное управление позволяет обеспечить точное воспроизведение режима сварки и контроль не только основных параметров (сварочный ток, напряжение между электродами, усилие сжатия электродов), но и перемещения подвижного электрода и его производных, что дает более достоверную оценку процесса рельефной сварки [207, 208].

Использование компьютерного управления позволяет генерировать новые законы регулирования, которые в дальнейшем могут применяться при построении серийных контроллеров контактной сварки.

Эффективная компьютеризация основных операций технологического процесса и методология исследований должны базироваться на более точных численных методах и подходах, основанных на достижениях в области информатики, электроники и электротехники [209]. Таким образом, компьютерная диагностика и управление контактной сваркой обеспечивают существенное повышение качества благодаря использованию большого объема данных и вычислительных алгоритмов при помощи автоматизированной системы на базе персонального компьютера.

Использование персональной ЭВМ при разработке алгоритмов управления контактными сварочными машинами, испытаниях сварочных машин и отработке оптимальных режимов контактной точечной сварки целесообразно по следующим причинам [54]:

– ЭВМ в связке с микроконтроллером становится универсальным инструментом для реализации алгоритмов управления любой сложности, при этом экономятся материальные затраты на другие дорогостоящие аппаратные средства и модернизацию устройства самой сварочной машины [210];



– существует возможность детальной записи и последующего замедленного воспроизведения необходимого потока данных, получаемого при сварке на экспериментальной установке, с их дальнейшим анализом.

Современные микропроцессорные регуляторы для управления и контроля контактных сварочных машин переменного тока обладают широкими функциональными возможностями. Они, как правило, осуществляют параметрическую стабилизацию по колебаниям сетевого напряжения и стабилизацию заданного значения сварочного тока. Стабилизация происходит с автоматической настройкой на $\cos\varphi$ сварочной машины, что исключает аварийные режимы ее работы.

Для подбора сварочного режима и осуществления высококачественной сварки важно обеспечить высокую динамику переходного процесса – время выхода на заданный ток должно быть не более одного периода напряжения питающей сети.

При этом регуляторы измеряют и выводят на индикацию целый ряд параметров:

- напряжение питающей сети;
- заданный ток в процентах от полнофазного тока;
- действующее значение сварочного тока;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- активное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании электродов;
- активное сопротивление свариваемых деталей;
- реактивное сопротивление вторичного контура;
- напряжение во вторичном контуре и установленный коэффициент трансформации;
- энергию импульса тока;
- усилие сжатия электродов;
- количество проведенных сварок.

Организация в системах автоматического управления обратных связей по сварочному току, падению напряжения на электродах и сопротивлению участка электрод–электрод делает необходимым работу с аналоговыми сигналами сложной формы, для измерения которых требуется применение высокоскоростных устройств сбора данных.

Для упрощения реализации алгоритмов управления целесообразно использовать косвенные параметры, такие как, например, длительность включенного состояния тиристоров λ . Отслеживание поведения тиристорного контактора необходимо для параметрической стабилизации сварочного тока в условиях колебаний напряжения питающей сети. При этом происходит измерение в каждом полупериоде величины λ и вычисление угла α_{n+1} открытия тиристоров в следующем периоде с учетом измеренного сетевого напряжения U_C [54, 87, 200].



При параметрической стабилизации можно судить лишь об относительном изменении сварочного тока при изменении напряжения питающей сети. При этом отсутствует возможность измерять и стабилизировать сварочный ток непосредственно.

В корректирующих системах регулирования мощности тепловложения вычисление угла α_{n+1} открытия тиристоров в следующем периоде будет определяться на основе измерения в предыдущем периоде действующих значений сварочного тока I_2 и напряжения $U_{\text{ЭЭ}}$, длительности включенного состояния тиристоров λ и пересчета коэффициента мощности $\cos\phi$ сварочной машины. В качестве примера такой корректирующей системы на рисунке 7.1 представлена структурная схема системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной точечной и рельефной сварке.

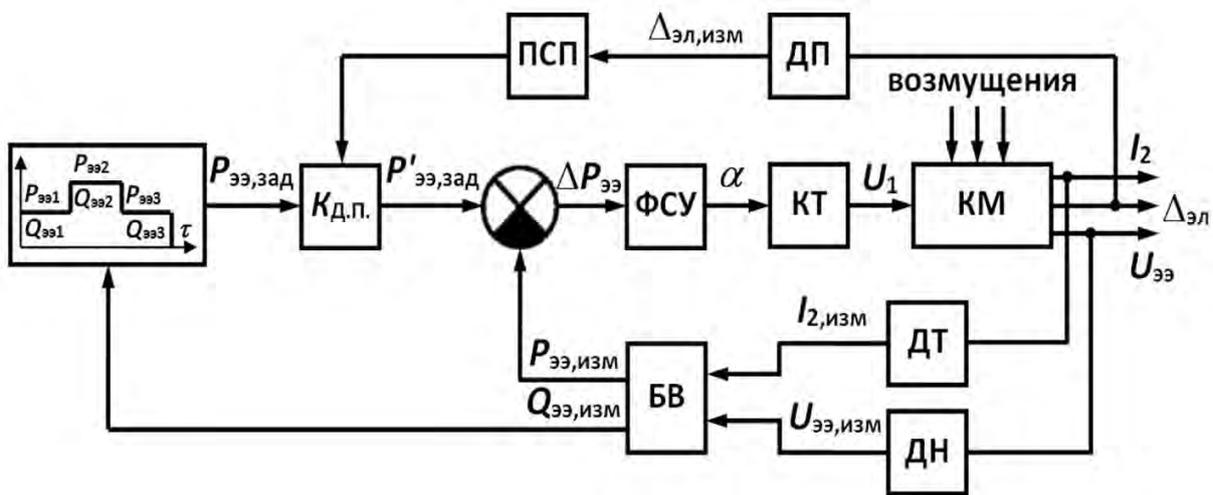


Рисунок 7.1 – Структурная схема системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной точечной и рельефной сварке

Согласно данной схеме мощность $P_{\text{ЭЭ,изм}}$, измеренная с помощью блока вычислений БВ, датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН, сравнивается с таблично заданной мощностью $P'_{\text{ЭЭ,зад}}$, по результатам сравнения производится коррекция воздействия на тиристорный контактор КТ через фазосдвигающее устройство ФСУ. Датчик перемещения подвижного электрода ДП служит для измерения деформации рельефа при рельефной сварке или для определения величины внедрения электродов в детали при точечной сварке, что является необходимым для определения момента выключения сварочного тока. Датчик ДП с помощью преобразователя сигнала перемещения ПСП воздействует на заданное значение мощности тепловложения $P_{\text{ЭЭ,зад}}$ через коэффициент КД.п. датчика перемещения. Значение угла управления тиристорами α корректируется в каждом периоде сетевого напряжения с учетом заданной циклограммы

мощности $P_{ЭЭi}$ и энергии $Q_{ЭЭi}$ тепловложения. Значение энергии тепловложения $Q_{ЭЭ,изм}$ определяется также с помощью блока вычислений БВ [194].

Одной из трудностей, возникающих при реализации систем автоматического управления мощностью тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке, является то, что при управлении тепловыделением на участке электрод–электрод необходимо задавать какую-то эталонную величину энергии тепловложения, требуемую для качественной сварки. Поэтому практическая реализация системы управления с использованием микропроцессорной техники, позволяющей оперативно обрабатывать алгоритмы управления, должна опираться на расчетное определение тепловыделения при сварке, включающее математическое моделирование протекания электрических процессов в условиях фазового регулирования и изменения динамического сопротивления $R_{ЭЭ}$ участка электрод–электрод.

7.2 Разработка аппаратной части корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

7.2.1 Структурная схема аппаратной части корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения. Структурная схема аппаратной части разрабатываемой системы включает в себя следующие компоненты (рисунок 7.2): терминал управления (персональную ЭВМ), модульный аналого-цифровой и цифроаналоговый измерительный преобразователь напряжений NI-USB 6251 (DAQ-устройство сбора данных серии М), блок управления симисторами и тиристорами ОВЕН БУСТ2, блок питания и согласования напряжений (БПСН), машину контактной сварки с исполнительными устройствами, органами управления и датчиками обратной связи, программируемый логический контроллер ПЛК 160-220.У-М, преобразователь линейного перемещения подвижного электрода ЛИР-17-40-01-05ПИ, тензорезисторы типа 1-LY15-10/120 для измерения усилия сжатия электродов, модуль аналогового ввода сигналов тензодатчиков ОВЕН МВ110-224.1ТД.

Через ПЭВМ в преобразователь напряжений NI-USB 6251 вводится программный код, позволяющий задавать циклограмму сварки, определяющую время срабатывания пневмораспределителей привода сжатия и тиристорного контактора, и циклограмму мощности тепловложения $P_{Зад}$. Преобразователь NI-USB 6251 отслеживает нажатие на педаль пуска сварочной машины, осуществляет выработку управляющего воздействия U_y , поступающего на вход блока управления тиристорами БУСТ2, и обработку сигналов обратной связи по сварочному току I_2 , напряжению межэлектродной зоны $U_{ЭЭ}$, сетевому напряжению питания U_1 и длительности включенного состояния тиристоров λ .



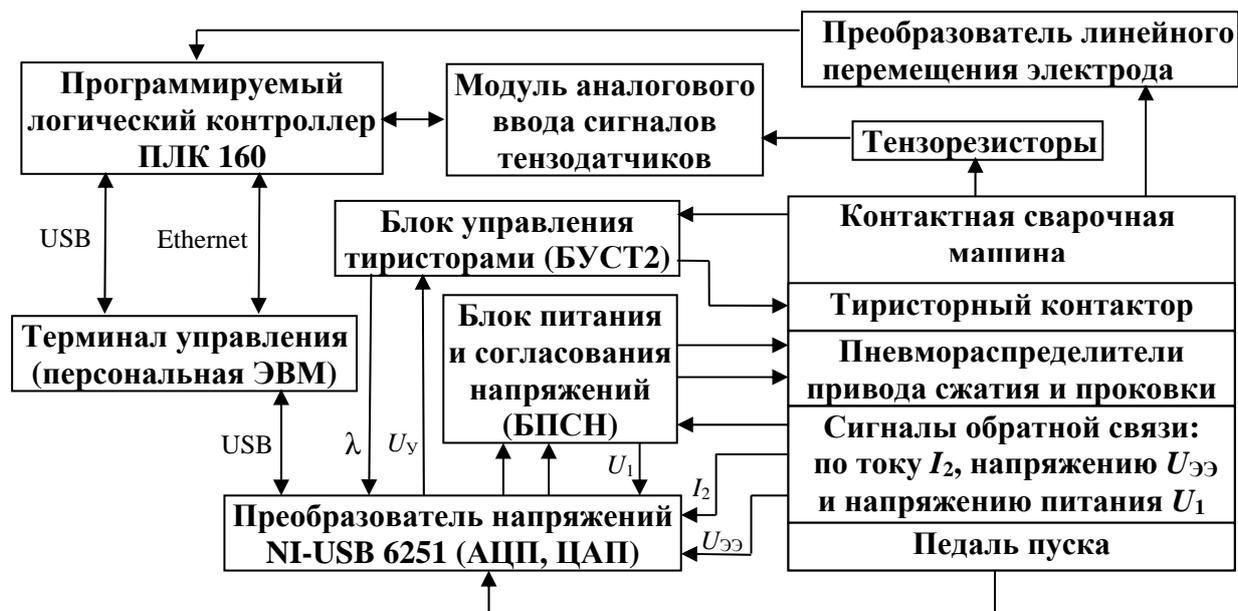


Рисунок 7.2 – Структурная схема корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения при контактной сварке

При построении корректирующей системы регулирования мощности тепловложения при сварке необходимо учитывать следующие условия:

- для эффективного контроля мощности и энергии тепловложения все измерения осуществляются непосредственно в процессе сварки;

- блок БУСТ2, функционирующий на частоте питающей сети 50 Гц, используется в качестве регулятора переменного напряжения для регулирования нагрузки, подключенной через сварочный трансформатор, с помощью стандартного управляющего сигнала $U_{\gamma} = 0..10$ В при коэффициенте мощности $0,4 < \cos\varphi < 1,0$;

- напряжение управления катушками пневматических распределителей составляет 24 В при постоянном токе около 0,5 А, что делает необходимым согласование уровней напряжения управления контактной сварочной машины и аппаратуры компьютерного управления, так как системы цифрового ввода-вывода не обеспечивают такой уровень сигналов;

- измерение параметров режима сварки происходит в одном полупериоде сетевого напряжения, поэтому время вычисления величины управляющего воздействия ограничено длительностью протекания следующего полупериода (т. е. менее 0,01 с);

- измерение параметров режима сварки и выдача управляющего воздействия осуществляется с помощью преобразователя напряжений NI-USB 6251, который должен обеспечить достаточную скорость работы с цифровыми и аналоговыми линиями (~ 10 кГц), иметь внутренний генератор

тактовой частоты, встроенный таймер-счетчик для отсчета времени включения тиристоров, быструю оперативную память;

– для управления сварочной машиной используются четыре цифровые линии (входы – педаль пуска, длительность λ включенного состояния тиристоров; выходы – управление двумя пневматическими распределителями привода сжатия) и четыре аналоговые линии (входы – сигналы датчиков сварочного тока I_2 и напряжения $U_{ЭЭ}$ межэлектродной зоны, сигнал напряжения U_1 питания сварочного трансформатора; выходы – управляющий сигнал U_y для блока управления тиристорами БУСТ2);

– точность задания угла управления тиристорами блока БУСТ2 в зависимости от уровня управляющего сигнала определяется числом градаций регулирования на один полупериод (256 градаций) и составляет $180/256 = 0,7^\circ$ (электрического градуса).

7.2.2 Блок управления симисторами и тиристорами БУСТ2. Блок БУСТ2 предназначен для управления тиристорами в составе регуляторов переменного напряжения, функционирующих на частоте 50 Гц питающей сети 220/380 В и используемых для регулирования напряжения питания резистивно-индуктивных нагрузок. Основная выполняемая им функция – преобразование входного управляющего сигнала в длительность открытого состояния тиристора. Блок используется для регулирования нагрузки, подключенной через трансформатор, при коэффициенте мощности $0,4 < \cos\varphi < 1,0$. Также может применяться для ручного управления уровнем мощности нагрузки (для этого предназначен регулятор на лицевой панели) и для автоматического регулирования мощности. В качестве управляющих сигналов могут выступать стандартные сигналы напряжения: 0...1 и 0...10 В или сигналы тока: 0...20 и 4...20 мА.

Блок имеет три идентичных канала управления тиристорами. Каждый канал состоит из устройства контроля перехода напряжения фазы через ноль, устройства контроля состояния тиристора, устройства контроля тока фазы, устройства обработки сигнала, формирователя импульсов однополярного тока. Функциональная схема управления блока БУСТ2 представлена на рисунке 7.3 [211].

Устройство контроля перехода через ноль формирует импульс в начале каждого полупериода соответствующей фазы (рисунок 7.4). Устройство контроля состояния тиристора анализирует состояние проводимости тиристоров на протяжении всей работы блока (рисунок 7.5). Устройство контроля перехода фазы через ноль и устройство контроля состояния тиристора синхронизируют работу устройства обработки сигналов.

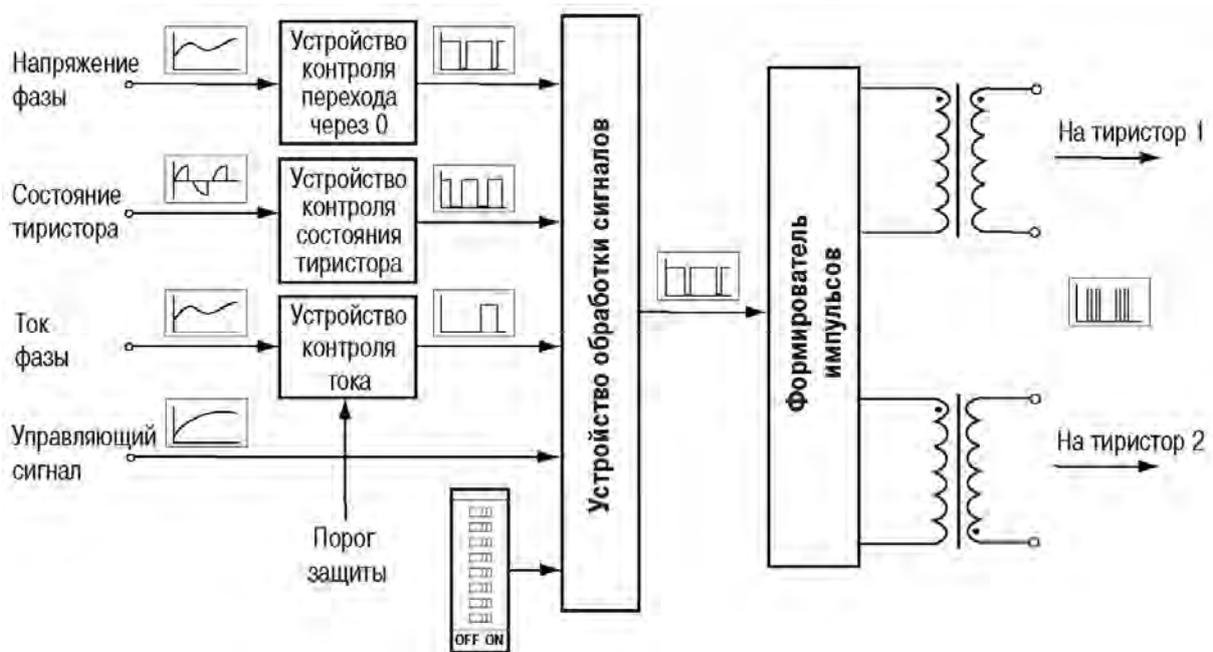


Рисунок 7.3 – Функциональная схема управления блока БУСТ2

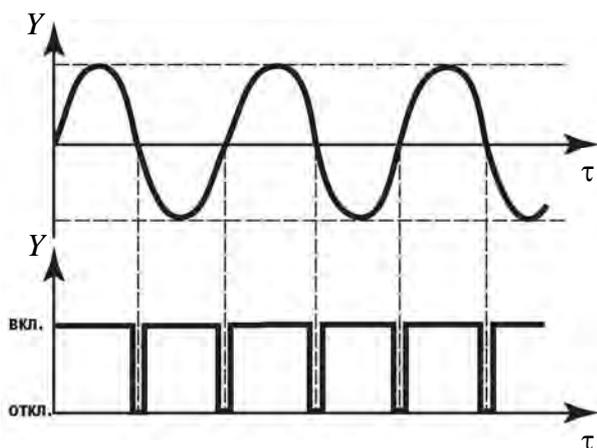


Рисунок 7.4 – Устройство контроля перехода фазы через ноль

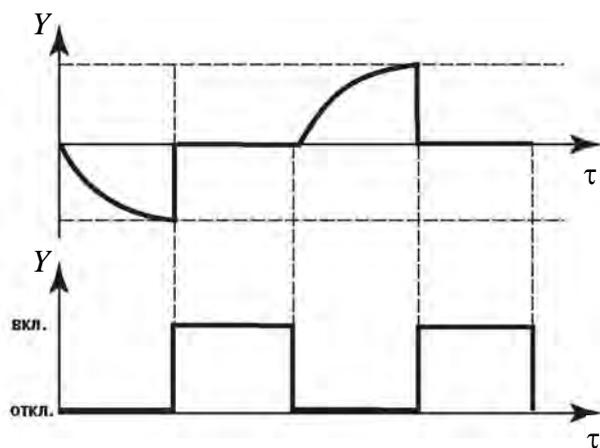


Рисунок 7.5 – Устройство контроля состояния тиристора

Устройство обработки сигналов (см. рисунок 7.3) определяет момент открытия тиристора в зависимости от величины сигнала управления и запускает формирователь импульсов. Формирователь импульсов имеет два изолированных выхода, что позволяет подключать к каждому каналу блока два тиристора (рисунок 7.6). Каждый выход при работе выдает однополярные импульсы тока амплитудой 0,5 или 1,5 А для открытия тиристорov.

При методе фазового управления осуществляется регулирование длительности открытого состояния тиристора в зависимости от уровня управляющего сигнала (рисунок 7.7). Регулирование производится по линейному закону. Число градаций регулирования равно 256 на один полупериод.

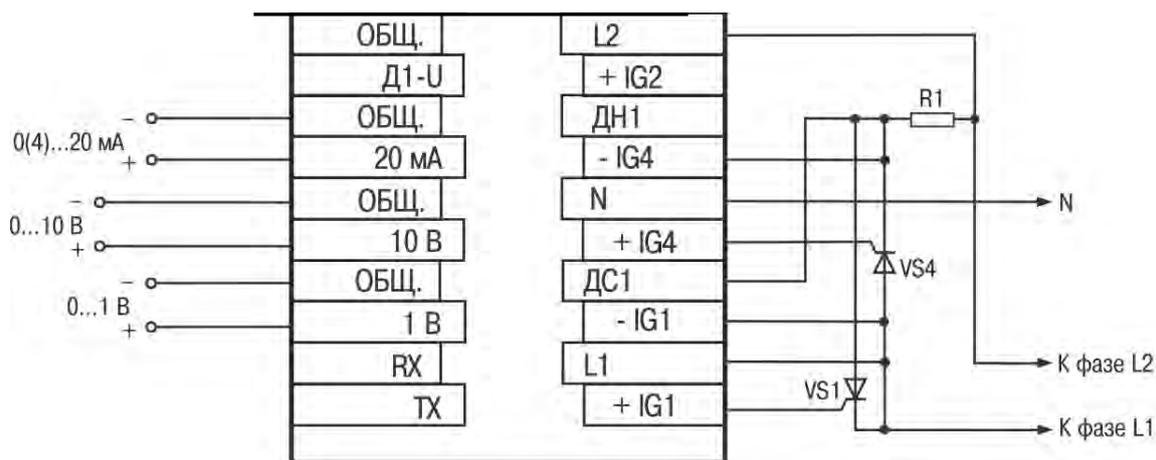


Рисунок 7.6 – Подключение тиристоров к каналу блока БУСТ2 для нагрузки «одна фаза, 380 В»

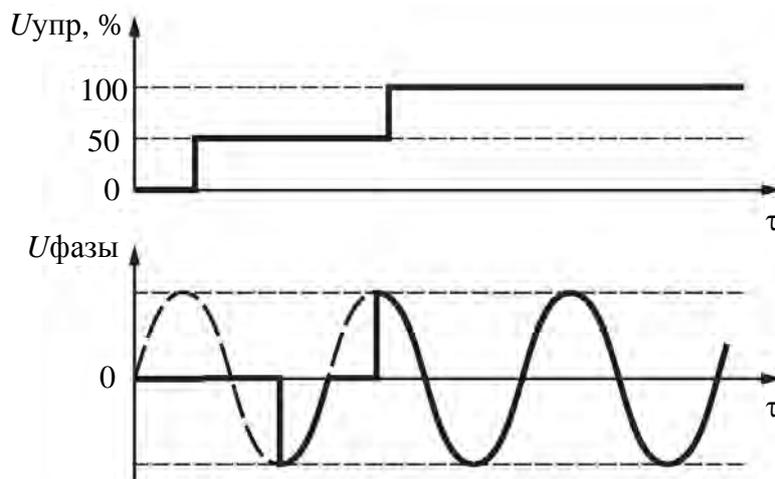


Рисунок 7.7 – Регулирование длительности открытого состояния тиристора в зависимости от уровня управляющего сигнала

7.2.3 Преобразователи напряжения измерительные аналого-цифровые и цифроаналоговые модульные NI-USB 6251. Устройство сбора данных NI-USB 6251 – это универсальный аналого-цифровой преобразователь напряжений, представляющий собой цифровую портативную микросхемную плату, которая позволяет регистрировать различные электрические сигналы, поступающие на ее входы, и формировать выходные аналоговые и цифровые сигналы управления [212].

Преобразователи напряжения NI-USB 6251 (DAQ-устройства сбора данных серии M) работают под управлением драйверов NI-DAQmx. DAQ-устройства NI-USB 6251 с винтовыми клеммами имеют 16 каналов

аналогового ввода (AI), два канала аналогового вывода (AO), 24 линии цифрового ввода-вывода (DIO) и два счетчика.

В состав типовой системы сбора данных (DAQ-системы) входят датчики и измерительные преобразователи, нормирующие устройства, соединительные кабели, устройство серии М, программное обеспечение и персональный компьютер (ПК – PC). DAQ-устройство дискретизирует сигналы, выполняет цифроаналоговые преобразования для генерации сигналов аналогового вывода, а также воспринимает сигналы цифрового ввода и формирует сигналы цифрового вывода. На рисунке 7.8 показаны компоненты, которые являются общими для всех устройств серии М.

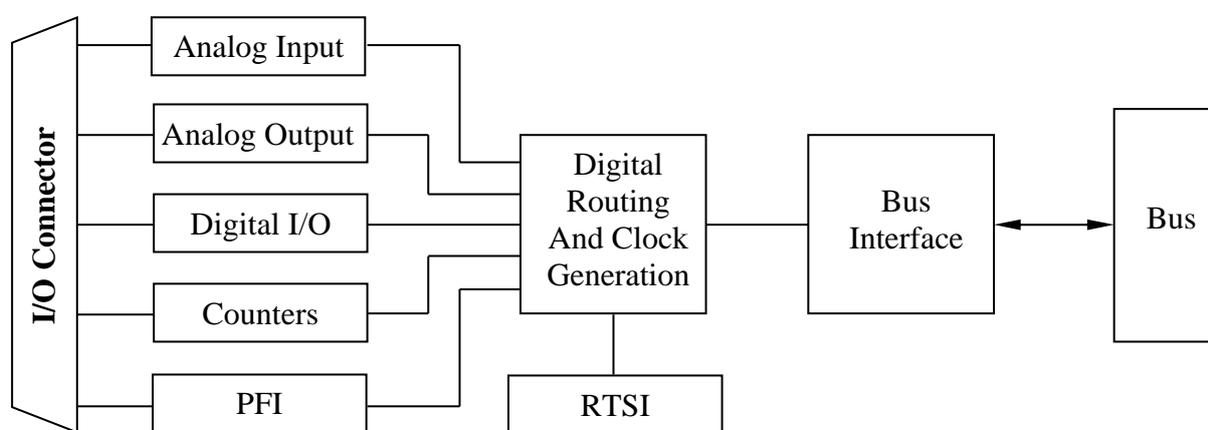


Рисунок 7.8 – Обобщенная блок-схема DAQ-устройства серии М

В состав DAQ-устройства серии М входят: I/O Connector – разъем ввода-вывода; Analog Input – аналоговый ввод; Analog Output – аналоговый вывод; Digital I/O – цифровой ввод-вывод; Counters – счетчики; PFI – программируемый функциональный интерфейс; Digital Routing and Clock Generation – маршрутизатор цифровых сигналов и генератор тактовых импульсов; RTSI – шина интеграции системы реального времени; Bus Interface – шинный интерфейс; Bus – шина.

Основные характеристики DAQ-устройства сбора данных серии М:

- гибкий выбор частоты дискретизации и времени преобразования сигналов аналогового ввода (AI) и аналогового вывода (AO);
- большое количество режимов запуска;
- независимые блоки памяти FIFO («первым зашел, первым вышел») для аналогового ввода, аналогового вывода, цифрового ввода (DI) и цифрового вывода (DO);
- генерация и маршрутизация сигналов внутреннего и внешнего запуска;
- два гибких 32-разрядных счетчика/таймера с аппаратным стробированием;
- сбор и генерация динамических цифровых сигналов;

- ввод-вывод статических цифровых сигналов;
- обнаружение изменения цифровых сигналов;
- фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ – PLL) генератора импульсов синхронизации;
- цельный интерфейс с устройствами нормирования сигналов;
- независимые контроллеры прямого доступа к памяти (scatter-gather DMA) для всех функций измерения и генерации.

Чтобы обеспечить эффективное и точное измерение, сигналы от многих датчиков и измерительных преобразователей необходимо согласовать с измерительной системой. Устройства нормирования измеряемых сигналов реализуют такие функции, как усиление, деление, фильтрация, гальваническая развязка, синхронная выборка и хранение (CBX) и мультиплексирование.

Программирование свойств преобразователя NI-USB 6251 осуществляется с помощью драйвера NI-DAQmx, представляющего собой большую библиотеку функций и виртуальных приборов (VI). Эти функции и виртуальные приборы можно вызвать из среды проектирования LabVIEW.

Для создания приложений драйвер NI-DAQmx имеет прикладной программный интерфейс (API), который представляет собой библиотеку виртуальных приборов, функций, классов, атрибутов и свойств.

Среда графического программирования LabVIEW даёт возможность разрабатывать виртуальные прототипы реальных систем управления, создавать терминалы управления, отлаживать созданные прототипы систем в интерактивном режиме и внедрять их в реальные устройства под управлением персональной ЭВМ. Программа LabVIEW позволяет не только имитировать электротехнические приборы, датчики, регуляторы и т. д., но и программировать ход протекающих через них электрических сигналов. Это возможно благодаря мощной инструментальной библиотеке данного программного продукта.

В составе устройств NI-USB серии M есть два 32-разрядных счетчика общего назначения и один генератор (синтезатор) частот. Счетчики-таймеры можно применять при решении многих измерительных задач и задач генерации импульсов.

В режиме измерения длительности импульса счетчик измеряет длительность импульсов включенного состояния тиристоров λ , поступающих на измерительный вход счетчика Gate. На вход счетчика Source подается внутренний или внешний периодический тактовый импульс (с известным периодом). Счетчик считает количество положительных (или отрицательных) фронтов сигнала на входе Source, пока уровень импульса на входе Gate является активным. Длительность импульсов λ вычисляется путем умножения периода сигнала на входе Source на количество фронтов, подсчитанных счетчиком.



7.2.4 Блок питания и согласования напряжений БПСН. Блок БПСН в составе системы управления (см. рисунок 7.2) обеспечивает питание катушек пневмораспределителей напряжением +24 В от источника U1 напряжением ~220 В через трансформатор TV1 и выпрямительный мост VD1, питание цепей управления через выпрямительный мост VD8, а также измерение сетевого межфазного напряжения ~380 В (рисунок 7.9) [200].

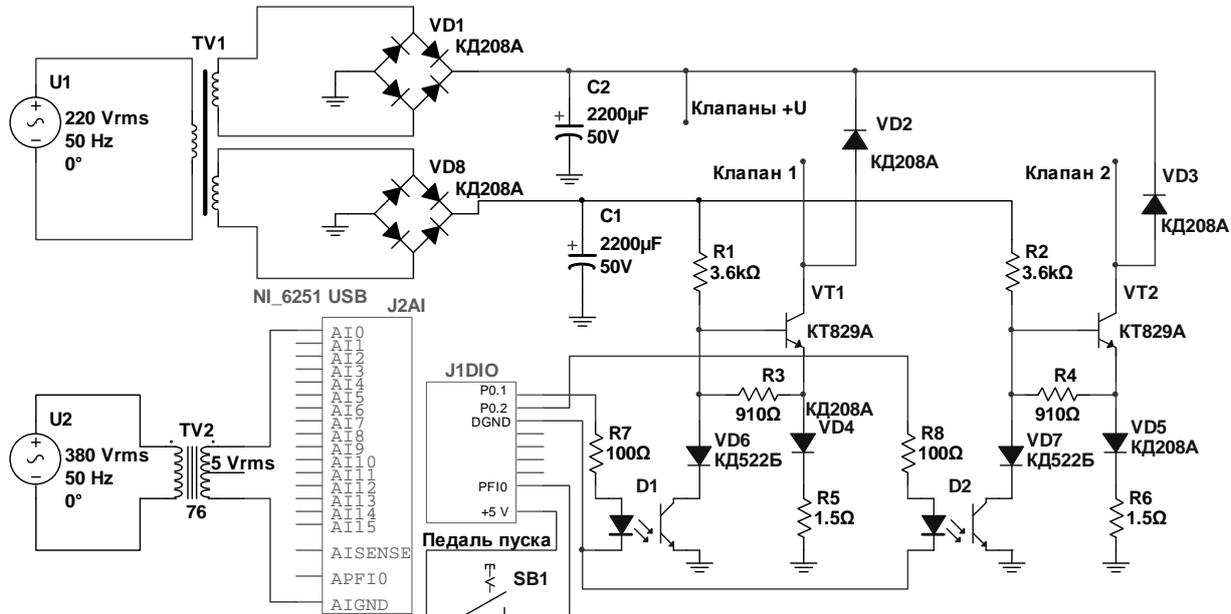


Рисунок 7.9 – Электрическая схема блока питания и согласования напряжений

Схема узла включения катушек управления пневмораспределителями привода сжатия обеспечивает гальваническую развязку с помощью оптронов D1 и D2 и защиту цепей управления от влияний подключаемой индуктивной нагрузки. Сигналы включения катушек подаются на цифровые выходы платы NI-USB P0.1 и P0.2, которые подключены через подтягивающие резисторы R7 и R8 к светодиодам оптронов D1 и D2. Выходные цепи оптронов подключают силовые транзисторы VT1 и VT2, с помощью которых цепи катушек замыкаются к схемной земле. Таким образом, при открытии транзисторов VT1 и VT2 через катушки клапанов, подключенных между выходом схемы «Клапаны +U» и выходами «Клапан 1» и «Клапан 2», потечет ток. Диоды VD2 и VD3 защищают силовые ключи от пробоя в случае коммутации индуктивной нагрузки: при отключении транзисторов VT1 и VT2 диоды пропускают ток нагрузки через себя.

Контроль нажатия педали пуска сварки SB1 осуществляется с помощью триггера PF10. До тех пор, пока педаль не нажата, система находится в режиме ожидания. После нажатия на педаль происходит запуск циклограммы контактной сварки.

Для измерения напряжения питания сварочной машины (источник U_2) в состав БПСН включен согласующий трансформатор TV2, подключенный к аналоговому входу АЮ преобразователя NI-USB. С помощью трансформатора TV2 напряжение питания снижается до ~ 5 В. Модуль аналого-цифрового преобразования позволяет с достаточной точностью измерить действующее значение вторичного напряжения трансформатора TV2 и с учетом коэффициента трансформации определить действующее значение сетевого напряжения.

7.2.5 Оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений ЛИР-17.

Для получения информации о текущем перемещении верхнего подвижного электрода при контактной точечной и рельефной сварке необходимо применять оптоэлектронные преобразователи линейных перемещений или фотоэлектрические датчики [22, 101]. Данные от датчиков могут использоваться устройствами сбора данных также для расчета скорости и ускорения перемещения электрода и их контроля. Было предложено использовать для этих целей фотоэлектрический преобразователь линейного перемещения со штоком ЛИР-17 [213]. Датчик позволяет измерять контактным методом перемещения до 40 мм с точностью 0,1...10 мкм.

В основу работы преобразователей линейных перемещений ЛИР-17 положен метод оптоэлектронного сканирования штриховых растров. В состав преобразователя входят два кинематически связанных звена – шкала растровая 1 и считывающий узел, включающий плату фотоприемников 2 (кремниевые фотодиоды), растровый анализатор 3 (пластина индикаторная) и плату осветителей 4 (инфракрасные излучатели) (рисунок 7.10). При относительном перемещении шкалы 1 и анализатора 3 сопряжения регулярного растра шкалы с растрами анализатора модулируют проходящие через них потоки излучения, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками 2.

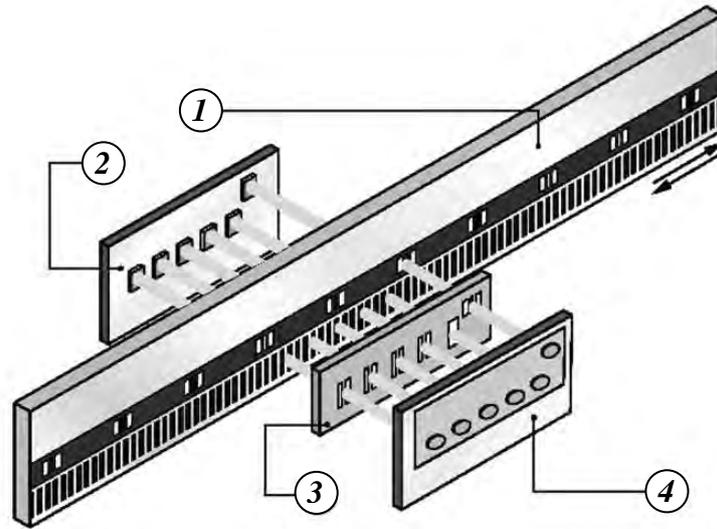
Шкала растровая содержит две параллельные информационные дорожки: регулярного растра и референтных меток (рисунок 7.11).

Анализатор растровый содержит четыре окна инкрементного считывания А, \bar{A} , В, \bar{B} и окно референтной метки Б. Последовательно с растровыми окнами расположено прозрачное окно Г (рисунок 7.12). Окна инкрементного считывания А, \bar{A} , В, \bar{B} позиционно согласованы с дорожкой регулярного растра шкалы; референтная метка Б – с дорожкой референтных меток растровой шкалы. Периоды растров в каждом окне равны периодам регулярного растра шкалы (20 или 40 мкм).

Инкрементальный преобразователь линейных перемещений на выходе имеет два сигнала, которые обозначаются как каналы А и В. Данные сигналы

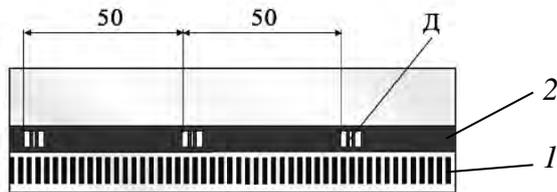


называются квадратурными, потому что между ними существует смещение фазы, равное $1/4$ цикла или 90 эл. град (рисунок 7.13, а).

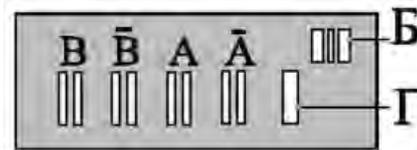


1 – шкала растровая; 2 – плата фотоприемников; 3 – растровый анализатор; 4 – плата осветителей

Рисунок 7.10 – Оптоэлектронный преобразователь линейных перемещений



1 – дорожка регулярного растра;
2 – дорожка референтных меток;
Д – референтная метка



А, \bar{A} , В, \bar{B} – окна инкрементного считывания; Б – окно референтной метки; Г – прозрачное окно

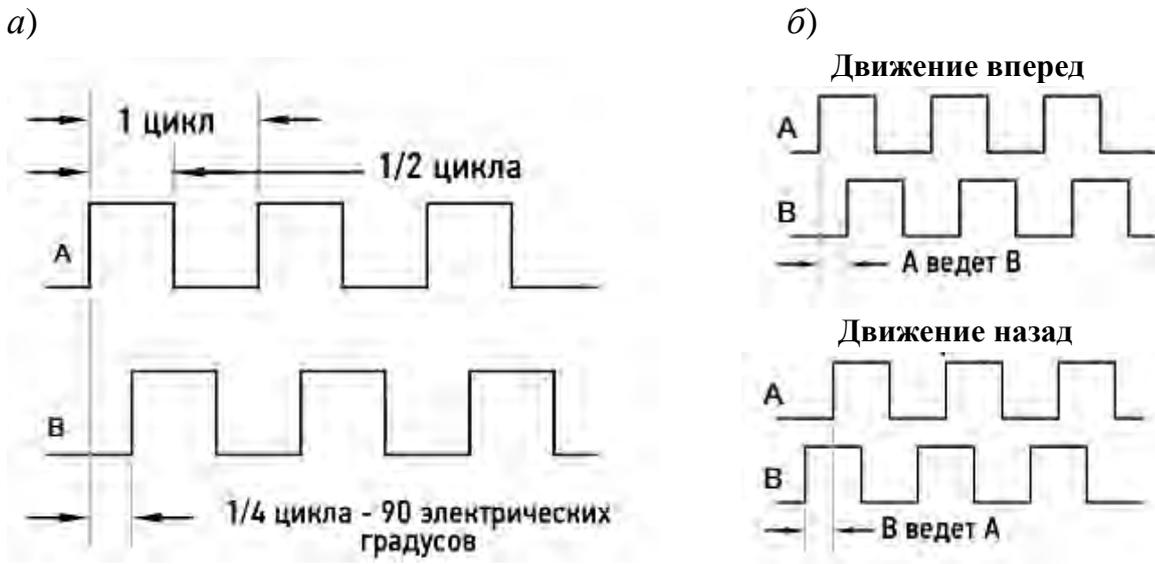
Рисунок 7.11 – Шкала растровая

Рисунок 7.12 – Анализатор растровый

Разница фаз каналов А и В используется для определения направления перемещения. В случае движения в одном направлении сигнал в канале А изменяется от низкого уровня к высокому раньше, чем в канале В, т. е. канал А ведет канал В. При движении в противоположном направлении канал В ведет канал А (рисунок 7.13, б).

Сигналы каналов А и В также используются для определения текущего положения штока. При регистрации квадратурного сигнала выполняется подсчет переходов сигнала от низкого уровня к высокому и от высокого к низкому в обоих каналах. Такой подсчет дает четыре отсчета для каждого цикла сигнала. Таким образом, по количеству отсчетов на длину перемещения

можно определить положение штока с точностью, большей, чем базовое разрешение растровой шкалы.



a – смещение фазы сигналов; *б* – определение направления перемещения

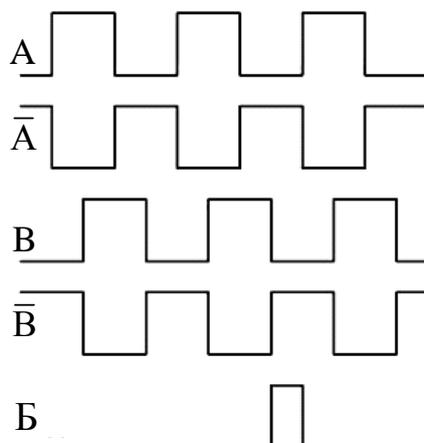
Рисунок 7.13 – Квадратурные каналы инкрементного считывания А и В

При передаче сигнала от датчика к контроллеру, чтобы минимизировать ухудшение сигнала, используют дифференциальные выходы A, \bar{A} и B, \bar{B} . Каждая дифференциальная пара A, \bar{A} и B, \bar{B} состоит из двух проводов в виде витой пары. Обычно витые пары используются для повышения помехоустойчивости сигнальных линий. Данные выходы являются комплементарными, потому, когда сигнал в одной линии высокого уровня, в другой линии он низкого уровня, как это показано на рисунке 7.14.

Построенный таким образом канал считывания информации позволяет сформировать два периодических сигнала I_A и I_B , сдвинутых по фазе, исключив из них постоянную составляющую. Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление перемещения, а число их периодов при данном перемещении – его величину L . Специальные методы обработки сигналов I_A и I_B позволяют обеспечить контроль перемещения с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра.

Для координатной привязки головки считывания к растровой шкале используется дорожка референтных меток, содержащая как минимум одну референтную метку – специальный растр с заданным расположением штрихов определенной ширины. В процессе относительного перемещения шкалы и головки считывающей при совмещении полей Д шкалы и поля Б анализатора с фотоприемника, сопряженного с полем Б, снимается аналоговый сигнал с ярко выраженным максимумом. Данный сигнал используется устройством

обработки для координатной привязки считывающего узла к началу диапазона перемещения. При этом учитывается значение опорного сигнала, задаваемого фотоприемником, соответствующим окну Γ анализатора.



A, \bar{A} и B, \bar{B} – пары дифференциальных выходов; B – сигнал референтной метки

Рисунок 7.14 – Временная диаграмма дифференциальных линий датчика

В преобразователях ЛИР-17 шкала жестко связана со штоком, который получает рабочее перемещение относительно анализатора неподвижного считывающего узла через контакт его наконечника с изделием пользователя. На выходах преобразователя ЛИР-17 формируются дискретные прямоугольные импульсные сигналы типа ПИ (TTL) (см. рисунок 7.14).

Таким образом, непрерывно меняющиеся сигналы преобразуются в дискретные, а это позволяет получить целый ряд преимуществ, к которым относятся:

- отсутствие необходимости механической настройки датчика во время измерения;
- возможность выполнения измерения из любого положения (система с «плавающим нулем»);
- высокая точность при повышенной помехоустойчивости;
- возможность измерения как при прямом, так и при реверсивном ходе электрода;
- наличие текущей информации в цифровом коде, что позволяет фиксировать характер перемещения электрода в течение всего времени сварки [22].

7.2.6 Датчики усилия сжатия электродов. При измерении усилия сжатия электродов в процессе контактной сварки наиболее широкое применение получил тензометрический метод измерения на основе использования фольговых константановых тензорезисторов, обеспечивающий высокую линейность и точность измерения [214]. Преобразование измеряемого усилия в

электрический сигнал происходит за счет упругой деформации проводящей части наклеенных тензорезисторов, что приводит к изменению их сопротивления и силы постоянного тока, которая и является выходным электрическим сигналом.

Принципиальная схема измерительного моста на двух тензорезисторах для регистрации усилия сжатия электродов при контактной сварке приведена на рисунке 7.15. Тензорезисторы R1 и R2 одинакового сопротивления наклеиваются на электрододержатель, который играет роль упругого элемента сжатия-растяжения, воспринимающего усилие сжатия. Тензорезистор R1 реагирует на упругую деформацию в направлении оси электрода. Тензорезистор R2 играет роль термокомпенсирующего элемента, так как в процессе сварки электрододержатель может нагреваться. Переменные резисторы R3 и R4 составляют плечи моста и используются для его балансировки перед измерением, поэтому во время регистрации выходной сигнал пропорционален только усилию сжатия. Кривая выходного напряжения тарируется стандартным динамометром, имеющим высокий класс точности [22]. Измерение усилия сжатия электродов осуществляется с помощью модуля аналогового ввода сигналов тензодатчиков MB110-224.1ТД и программируемого логического контроллера ПЛК 160.

Тензоэлектрический датчик – это измерительный преобразователь деформации твердого тела, вызываемой механическими напряжениями, в электрический сигнал. Действие тензорезисторов основано на их свойстве изменять электрическое сопротивление под влиянием деформации (растяжения или сжатия). Тензорезисторы подключают в мостовую или полумостовую измерительную схему, которая позволяет определять малые деформации. Преимущества данных преобразователей заключаются в их высокой чувствительности, недостатки – в сложности схемы измерения слабых сигналов и сильной зависимости сигналов от температуры [101].

Линейные тензорезисторы 1-LY15-10/120 с одной измерительной решёткой предназначены для измерения деформаций в одном направлении (рисунок 7.16). Номинальное сопротивление тензорезисторов 120 Ом. Активная длина измерительной решётки $a = 10$ мм. Коэффициент преобразования тензорезистора k представляет собой коэффициент пропорциональности между относительным изменением сопротивления и измеряемой деформацией: $R/R_0 = k \cdot \varepsilon$ [214].

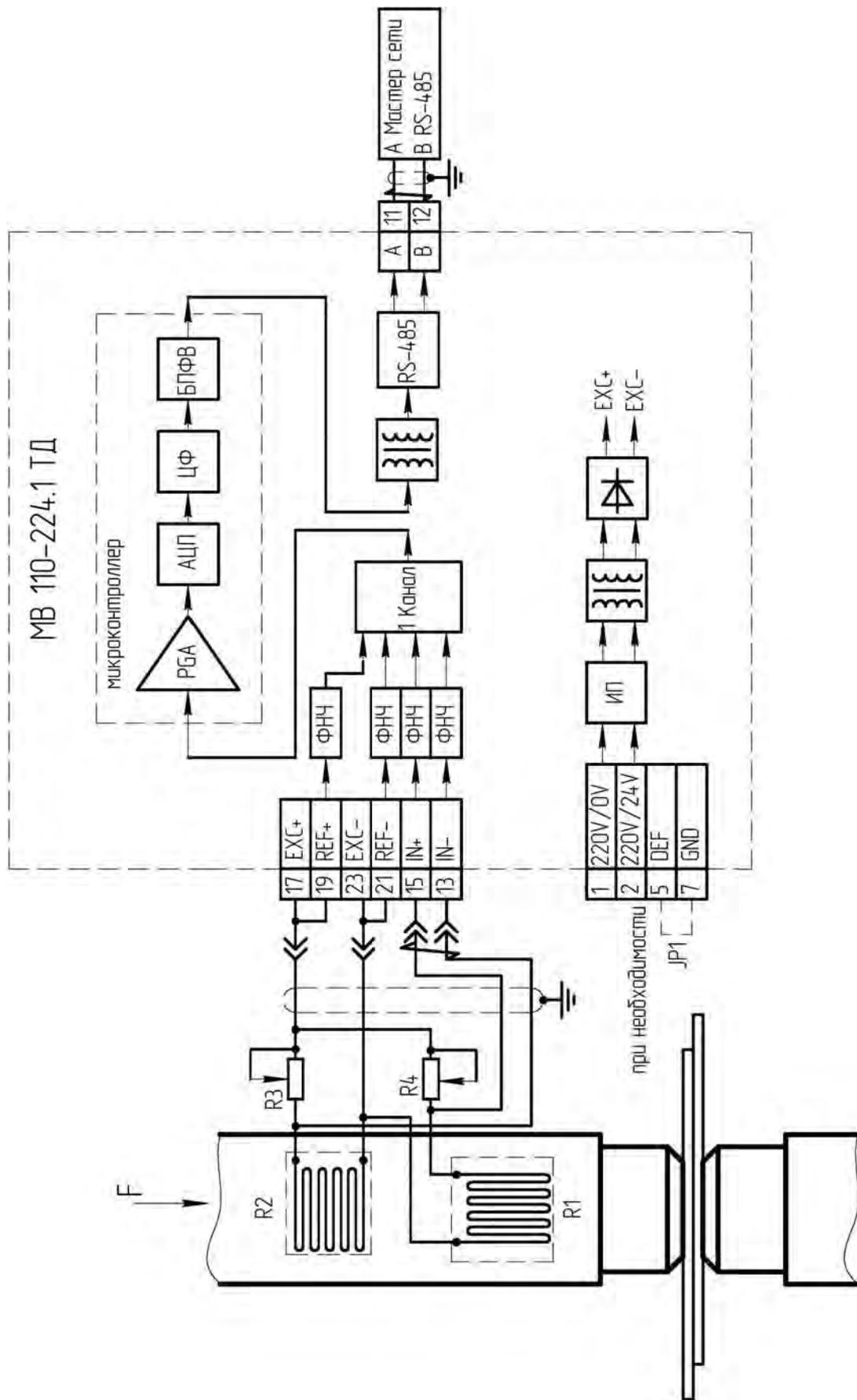


Рисунок 7.15 – Регистрация усилия сжатия электродов при контактной сварке с помощью наклеенных тензорезисторов и модуля аналогового ввода MB110-224.1ТД



Прибор ОВЕН МВ110-224.1ТД предназначен для измерения сигналов мостовых тензометрических датчиков, преобразования данных измерений в значение физической величины и передачи результатов измерения в сеть RS-485 [215]. Он имеет один измерительный канал для подключения одного тензометрического датчика мостового типа. Входным сигналом для прибора является постоянное напряжение с выхода резистивного моста (см. рисунок 7.15). ОВЕН МВ110-224.1ТД вырабатывает постоянное напряжение величиной 2,5 В для питания тензорезистивного моста (тензодатчика), клеммы прибора ЕХС+, ЕХС-. С диагонали моста выходной сигнал поступает на входы прибора IN+, IN- и через помехоподавляющие фильтры низких частот ФНЧ приходит на вход АЦП. Опорным напряжением для АЦП служит напряжение питания моста, измеряемое непосредственно на клеммах датчика, входы REF+, REF- (при шестипроводной схеме подключения). Необходимый размах входного сигнала для АЦП формирует усилитель с программируемым коэффициентом усиления (PGA). Прибор имеет семь переключаемых диапазонов измерений. Необходимый входной диапазон измерений выбирается пользователем в процессе конфигурации прибора. Частота дискретизации АЦП, находящегося в составе микроконтроллера, 8 кГц. Цифровой фильтр (ЦФ) обеспечивает дополнительную фильтрацию от импульсных помех и помех с частотами, кратными частоте промышленной сети 50 Гц. Параметры ЦФ являются постоянными и недоступны пользователю.



Рисунок 7.16 – Структура линейных тензорезисторов типа 1-LY15-10/120

Цифровое значение измеряемого сигнала вычисляется с использованием значений нижней и верхней границ диапазона физической величины. После преобразования в блоке приведения к диапазону физической величины (БПФВ) цифровой код поступает в ячейку памяти, которая обновляется с частотой 47 Гц.

Результаты измерения из данной ячейки по запросу передаются мастеру сети RS-485 (программируемый логический контроллер ПЛК 160) с помощью драйвера интерфейса RS-485 (выходные клеммы А и В). Интерфейс RS-485 гальванически изолирован от других цепей для улучшения помехоустойчивости. Тип протокола определяется автоматически.

Отличительной особенностью прибора является наличие в нем универсального импульсного источника питания (ИП) с гальванической развязкой, который позволяет прибору работать как от сети переменного тока с напряжением 220 В частотой 50 Гц, так и от источника постоянного тока с напряжением 24 В.

7.3 Разработка программного кода корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения

Структурная схема программного кода корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке представлена на рисунке 7.17.

Запуск программы осуществляется нажатием на педаль пуска SB1 машины контактной сварки. При этом срабатывает цифровой триггер PFI 0 (разъём J1_DIO) и запускает блок цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы. Блок цикла управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки (ЭПК 1 и ЭПК 2), а также включением сварочного тока цифровым триггером PFI 1 (разъём J1_DIO) после отсчета предварительного сжатия, заданием напряжения управления U_y для блока БУСТ2 и, соответственно, угла открытия тиристорov α .

Блок БУСТ2 открывает тиристоры с начальным углом управления $\alpha_n = \alpha_{\max}$ и подключает сварочный трансформатор ТС к сети, во вторичной цепи начинает протекать сварочный ток. Во время сварки измеряются сетевое напряжение u_1 трансформатором TV2 (аналоговый вход AI0–AIGND, несимметричная заземленная схема подключения RSE, разъём J2_AI), напряжение межэлектродной зоны $u_{\text{ЭЭ}}$ (дифференциальный аналоговый вход AI2–AI10 DIFF) и сварочный ток i_2 (дифференциальный аналоговый вход AI3–AI11) с помощью датчиков тока и напряжения.

Начало расчета действующих значений (RMS) параметров U_1 , $U_{\text{ЭЭ}}$, I_2 (см. рисунок 6.3) задаётся с помощью аналогового триггера на входе APFI 0 (Start Analog Edge), уровень срабатывания которого определяется выражением

$$\frac{U_{\text{СМ}}}{K_{\text{T}}} \cdot \cos \varphi, \quad (7.1)$$

где $U_{\text{СМ}}$ – амплитудное значение напряжения сети;

K_{T} – коэффициент трансформации вспомогательного измерительного трансформатора TV2, $K_{\text{T}} = 76$.

Начало расчета действующих значений (RMS) совпадает с переходом через ноль установившегося однофазного (принужденного) тока $i_{\text{ПР}}$ (см. формулу (6.11)).

На основании $U_{\text{ЭЭ}}$ и I_2 рассчитываются мощность тепловложения $P_2 = U_{\text{ЭЭ}} I_2$ и сопротивление межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}} = U_{\text{ЭЭ}} / I_2$ в текущем полупериоде.



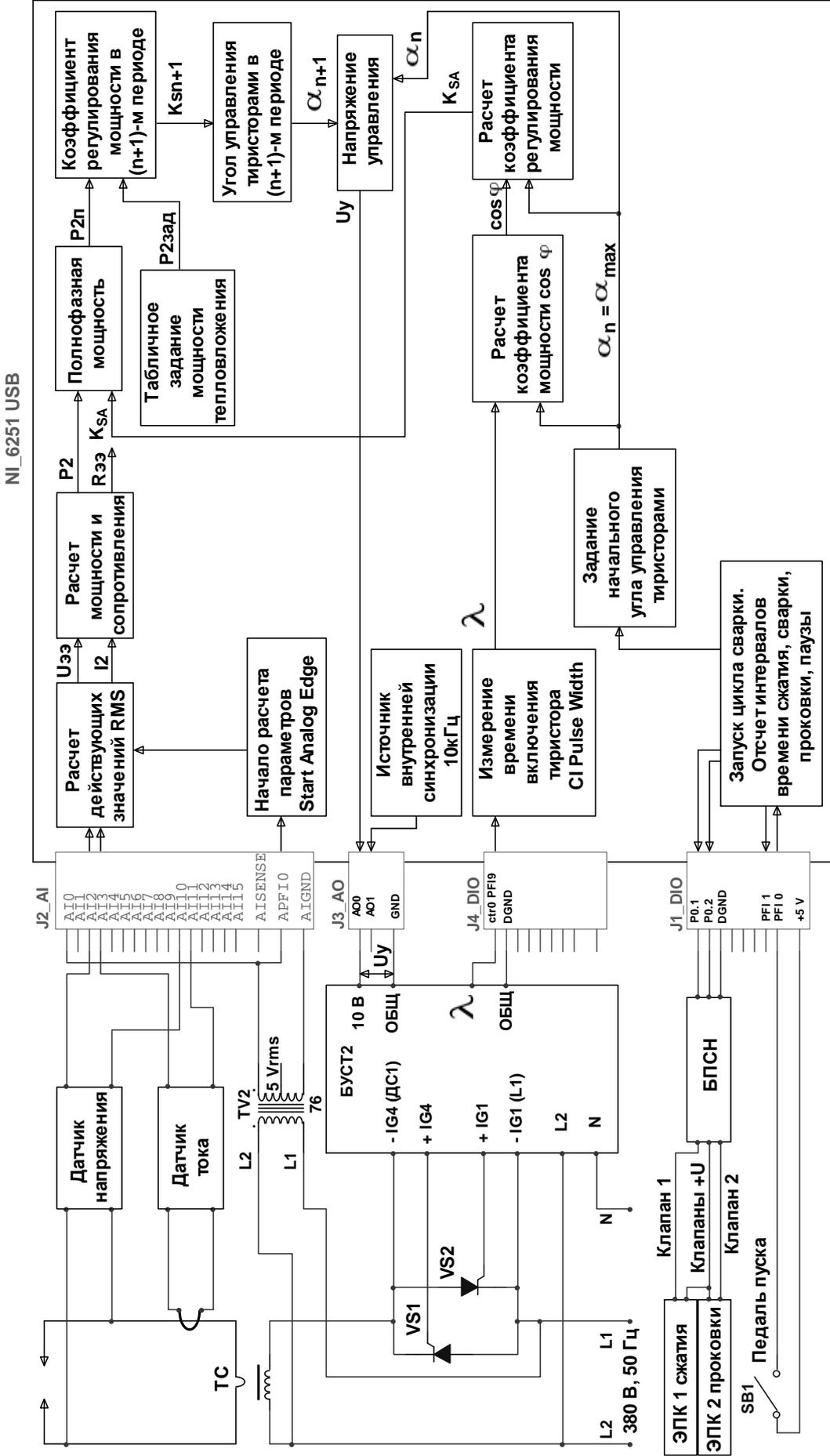


Рисунок 7.17 – Структурная схема программы корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке

Во время протекания тока блок БУСТ2 формирует прямоугольный импульс, равный по времени длительности включенного состояния тиристор-ов λ . Этот сигнал поступает на вход счетчика $ctr0$ PFI9 (разъём J4_DIO), с помощью которого осуществляется измерение ширины импульса λ (CI Pulse Width).

Далее на основании начального угла управления тиристорами $\alpha_n = \alpha_{\max}$ и длительности включенного состояния тиристор-ов λ по аппроксимирующей зависимости (6.50) определяется коэффициент мощности $\cos\varphi = f(\alpha_n, \lambda)$ сварочной машины.

Расчет коэффициента регулирования мощности происходит по аппроксимирующей зависимости (6.40) $k_{S,A} = f(\alpha_n, \cos\varphi)$.

Зная коэффициент регулирования мощности $k_{S,A}$ и мощность тепловложения P_2 в текущем полупериоде, можно найти полнофазную мощность $P_{2П} = P_2 / k_{S,A}$.

Задание мощности тепловложения $P_{23АД}$ осуществляется в табличном виде с интервалом 10 мс, равным полупериоду сетевого напряжения.

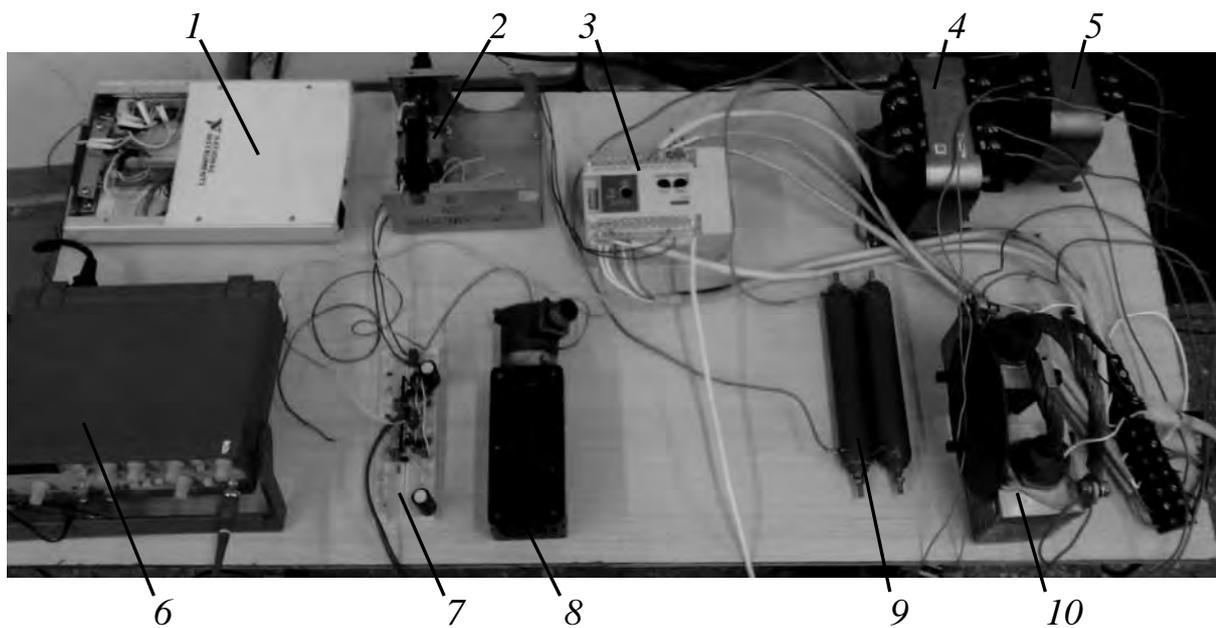
Таким образом, коэффициент регулирования мощности $k_{S_{n+1}}$ в следующем $(n + 1)$ -м периоде определяется из соотношения $k_{S_{n+1}} = P_{23АД} / P_{2П}$. Зная коэффициент $k_{S_{n+1}}$, можно определить угол управления тиристорами в $(n+1)$ -м периоде α_{n+1} и сформировать напряжение управления U_y для блока БУСТ2 на аналоговом выходе АОО–GND (разъём J3_AO). Далее процесс пересчета повторяется в соответствии с заданной мощностью $P_{23АД}$. Выключение тока происходит при задании нулевой мощности, при этом начинается отчет времени проковки сварного соединения. После выдержки паузы между сварками циклограмма процесса запускается сначала.

Для разработки и отладки программного кода была разработана специализированная экспериментальная установка (рисунок 7.18).

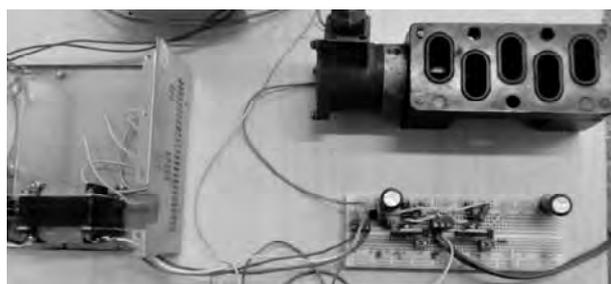
Экспериментальная установка обеспечивает отладку программного кода системы автоматического регулирования мощности тепловложения. Она состоит из следующих компонентов: 1 – плата сбора данных NI-USB 6251; 2 – трансформатор TV1 питания блока БПСН (см. рисунок 7.9); 3 – блок управления тиристорами ОВЕН БУСТ2; 4 – трансформатор ТС, имитирующий сварочный (см. рисунок 7.17); 5 – вспомогательный измерительный трансформатор TV2 (см. рисунки 7.9 и 7.17); 6 – многофункциональный генератор для задания сигнала синхронизации; 7 – блок питания и согласования напряжений БПСН; 8 – электропневмоклапан; 9 – нагрузка трансформатора ТС; 10 – тиристорный контактор.



а)



б)



в)



а – общий вид; б – подключение электропневмоклапана с помощью блока БПСН;
в – подключение трансформатора ТС с помощью тиристорного контактора

Рисунок 7.18 – Экспериментальная установка, обеспечивающая отладку программного кода системы автоматического регулирования

Для отладки программы на экспериментальной установке без подключения контактной сварочной машины требовалась в первую очередь симуляция сигналов датчиков сварочного тока i_2 , напряжения $u_{ЭЭ}$ и включенного состояния тиристоров λ (рисунок 7.19). Исходными данными для получения сигналов являлись: напряжение управления $U_y = 5$ В; угол открытия тиристоров $\alpha = 90^\circ$; амплитуда однофазного напряжения участка электрод–электрод $U_{ЭЭПm} = 1,5$ В; полное сопротивление сварочного контура $Z_2 = 0,0001$ Ом = $= 100$ мкОм; амплитуда однофазного вторичного тока $I_{2Пm} = 15000$ А = 15 кА; амплитуда напряжения датчика тока $U_{ДТm} = 3$ В; угол сдвига фаз напряжения и тока $\varphi = 60^\circ$, $\cos\varphi = 0,5$.

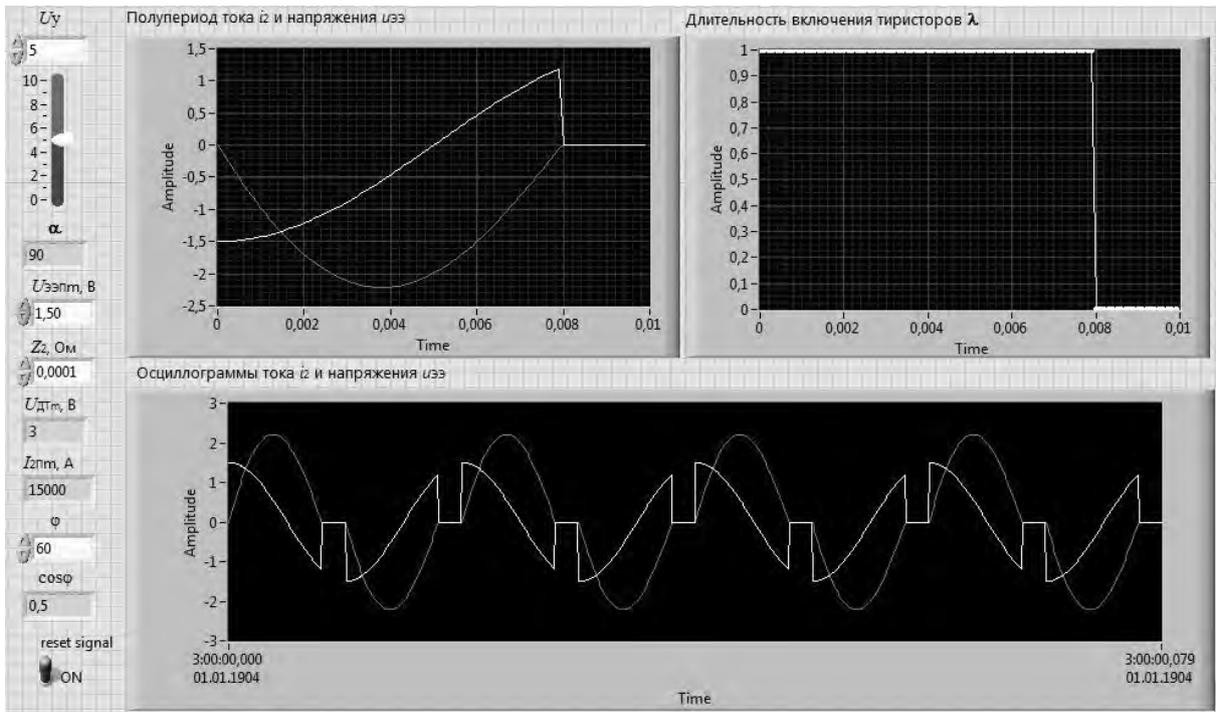


Рисунок 7.19 – Программная симуляция сигналов датчиков сварочного тока i_2 , напряжения u_{22} и включенного состояния тиристоров λ

На рисунке 7.20 показаны сигналы датчика тока при полнофазном включении и при фазовом регулировании. Сигналы датчиков тока и напряжения генерируются на аналоговых выходах и передаются на аналоговые входы внутри устройства сбора данных NI-USB 6251.



Рисунок 7.20 – Сигналы датчика тока $U_{дт}$ при полнофазном включении тока $i_{2п}$ и при фазовом регулировании i_2

Задание мощности тепловложения и формирование сигнала управления для блока БУСТ2 показано на рисунке 7.21. При этом задание мощности $P_{23АД}$ происходит в табличном режиме с интервалом 10 мс, равном полупериоду сетевого напряжения (см. рисунок 7.21, а). С таким же интервалом производится расчет коэффициента регулирования мощности k_{Sn+1} , угла открытия

тиристоров α в радианах и градусах. В результате формируется сигнал управления U_y для блока БУСТ2 (см. рисунок 7.21, б).

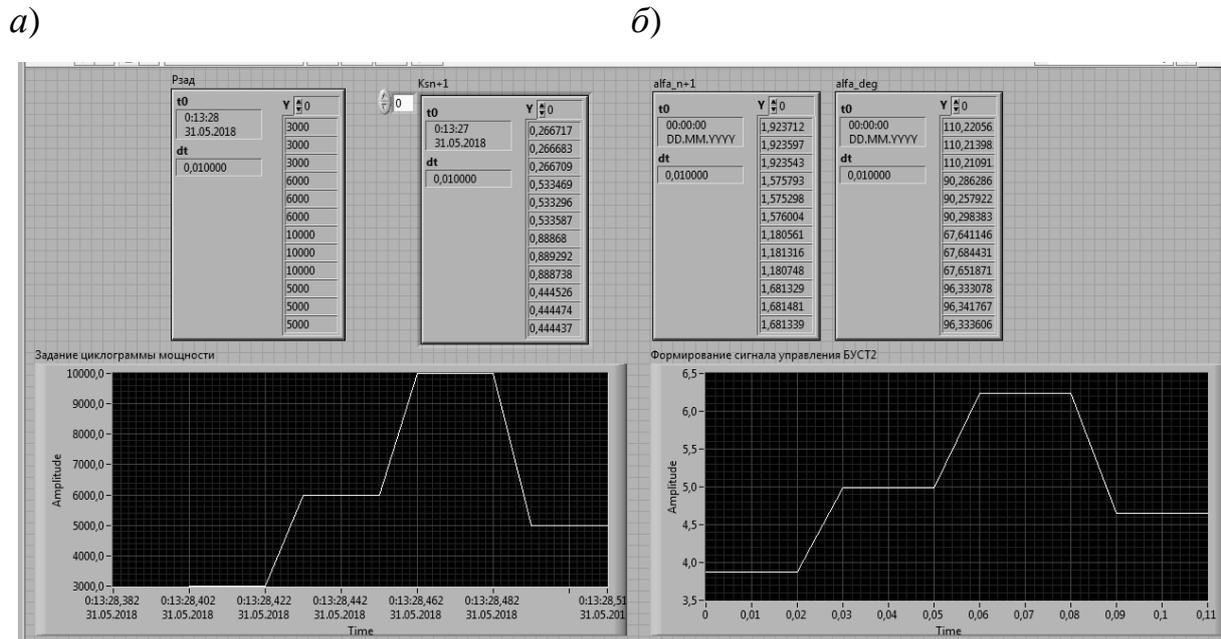


Рисунок 7.21 – Задание мощности тепловложения (а) и формирование сигнала управления U_y для блока БУСТ2 (б)

Для формирования циклограммы сварки используется структура кадровой последовательности *"Stacked Sequence Structure"*. Нумерация кадров определяет последовательность их выполнения. В каждом кадре формируется цикл *"While Loop"*, который повторяет диаграмму внутри него до тех пор, пока не появится логический сигнал выхода из цикла.

В первом цикле структуры происходит ожидание нажатия педали и запуск циклограммы сварки (рисунок 7.22). При этом срабатывает цифровой триггер PFI 0/P1.0 (см. рисунок 7.17). Блок *"Convert to Dynamic Data"* преобразует цифровой сигнал триггера в логический тип *"Boolean"* (*"True"* или *"False"*). При появлении сигнала *"True"* происходит завершение данного цикла и переход к следующему. Кроме того, в первом цикле осуществляется построение массива логических цифровых сигналов (*"Build Array"*) для управления электропневмоклапанами сжатия (Кл.1), проковки (Кл.2) и включения сварочного тока. Начальное значение всех цифровых сигналов – *"False"*.

Во втором цикле происходит задание и отсчет времени предварительного сжатия электродов с помощью таймера *"Elapsed Time"* (рисунок 7.23). Если значение входа *"Set Start Time (s)"* равно 0, текущее абсолютное время используется как время начала отсчета. При этом задается логический сигнал *"True"* управления клапаном сжатия, срабатывает цифровой выход P0.1

(см. рисунок 7.17) и электроды сварочной машины сжимаются с усилием сжатия $F_{СЖ}$.

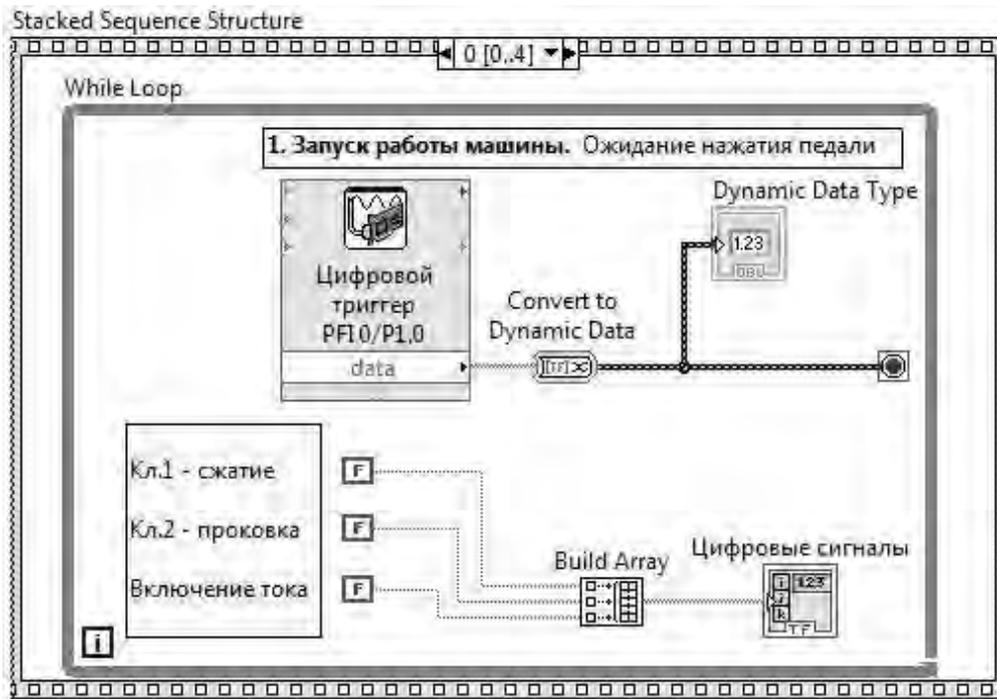


Рисунок 7.22 – Ожидание нажатия педали и запуск циклограммы сварки



Рисунок 7.23 – Задание времени предварительного сжатия электродов

На входе "Time Target (s)" устанавливается время предварительного сжатия, по истечении которого на выходе "Time has Elapsed" устанавливается высокий уровень "True", и цикл завершается.

В третьем цикле задается и отсчитывается время протекания сварочного тока (рисунок 7.24).

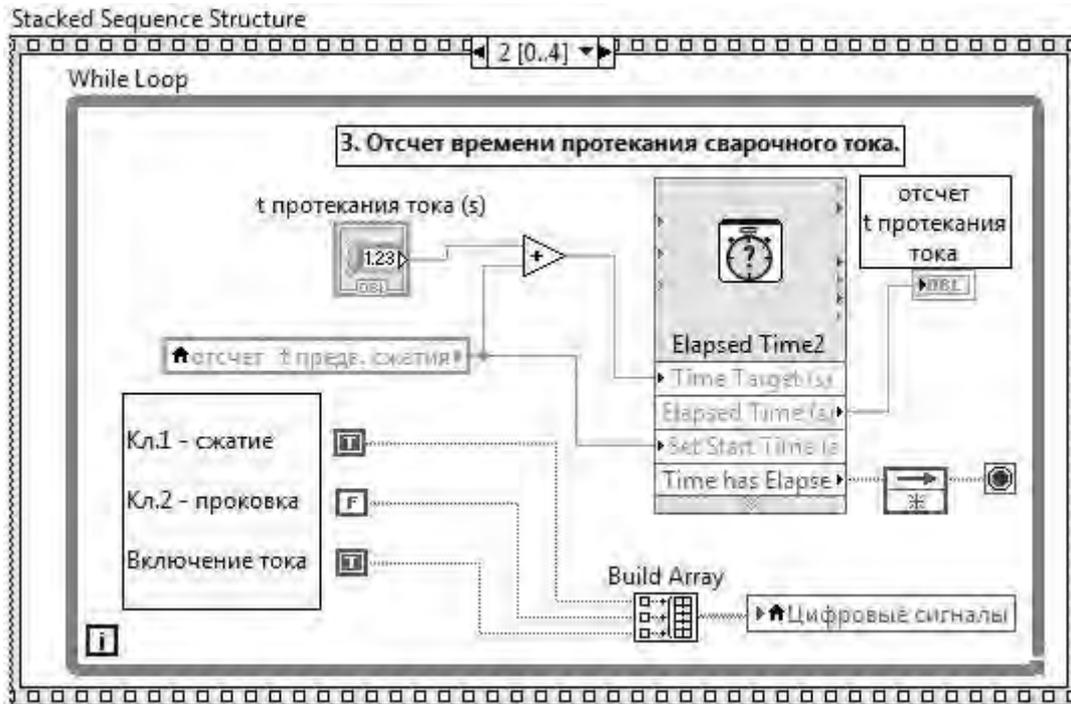


Рисунок 7.24 – Задание времени протекания сварочного тока

Для непрерывной работы таймера "Elapsed Time2" начало отсчета на входе "Set Start Time (s)" совпадает с отсчетом времени предварительного сжатия в предыдущем цикле, а на входе "Time Target (s)" устанавливается сумма времени предварительного сжатия и времени протекания тока.

Включение тока осуществляется логическим сигналом "True", при этом срабатывает цифровой триггер PFI 1/P1.1 (см. рисунок 7.17). Далее идет задание мощности P_{23AD} в табличном режиме с интервалом 10 мс и формирование сигнала управления U_y блока БУСТ2 с коррекцией в каждом полупериоде сварочного тока (см. рисунок 7.21). Для гарантированного выключения тока на последнем интервале продолжительности сварки должна быть задана нулевая мощность для обнуления аналогового выхода AO0-GND (см. рисунок 7.17).

В четвертом цикле начинается проковка сварного соединения. Для непрерывной работы таймера "Elapsed Time3" начало отсчета на входе "Set Start Time (s)" устанавливается равным сумме времен предварительного сжатия и протекания тока, а на входе "Time Target (s)" к ним добавляется время проковки (рисунок 7.25). При этом задается логический сигнал "True" управления клапаном проковки, срабатывает цифровой выход P0.2 (см. рисунок 7.17) и к сварному соединению прикладывается повышенное усилие проковки $F_{КОВ}$. Цикл завершается после отсчета времени проковки.



Рисунок 7.25 – Задание времени проковки сварного соединения

Заканчивается кадровая последовательность пятым циклом задания времени паузы между сварками. При этом для всех логических сигналов задается низкий уровень "False", электроды сварочной машины разжимаются (рисунок 7.26). Для таймера "Elapsed Time4" начало отсчета на входе "Set Start Time (s)" устанавливается равным сумме времен предварительного сжатия, протекания тока и проковки, а на входе "Time Target (s)" к ним добавляется время паузы. Если программа LabVIEW запущена командой "Run", то после отсчета времени паузы процесс сварки останавливается, отработывается режим «Одинокая сварка». Если выбирается команда запуска "Run Continuously", то при удержании педали пуска устанавливается режим «Автоматическая сварка» с многократным повторением через заданную паузу между сварками.

В процессе выполнения кадровой последовательности создается локальная переменная «Цифровые сигналы», которая используется для формирования в отдельном цикле цифровых выходов P0.1 (сжатие), P0.2 (проковка) и триггера PFI 1/P1.1 (включение тока) (рисунок 7.27).

Еще одна локальная переменная "Time has Elapsed" используется для перезапуска программы и сброса таймеров во время отсчета паузы между сварками. В начале выполнения пятого цикла последовательности (см. рисунок 7.26) логический сигнал "Time has Elapsed" сбрасывается в нулевое значение "False", при этом цикл формирования цифровых выходов останавливается, так как через инвертор "Not" срабатывает условие завершения цикла (см. рисунок 7.27).

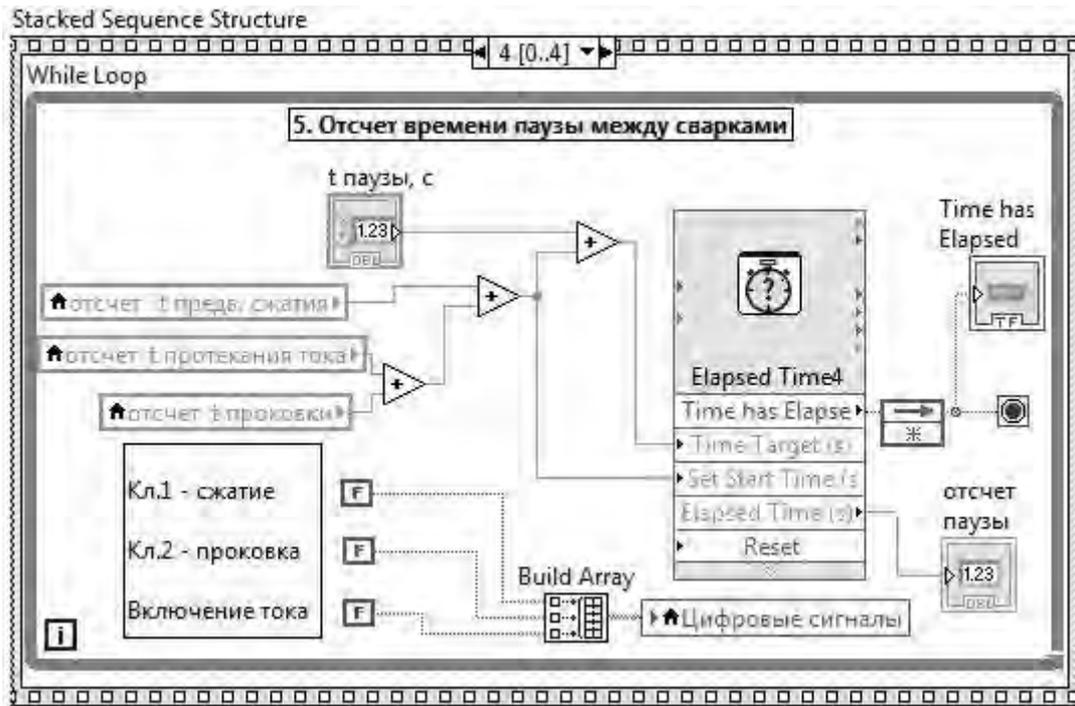


Рисунок 7.26 – Задание времени паузы между сварками

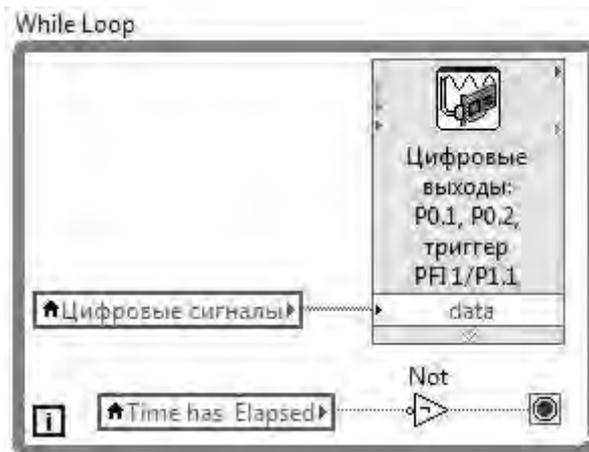


Рисунок 7.27 – Цикл формирования цифровых выходов и сброса таймеров во время отсчета паузы между сварками

После отсчета паузы сигнал *"Time has Elapsed"* снова устанавливается в высокое состояние *"True"* и разрешает работу цикла формирования цифровых выходов, при этом таймеры начинают отсчет сначала.

7.4 Разработка способа рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью тепловложения в зону соединения

Совершенствование термомодеформационного цикла контактной рельефной сварки в силу ограниченности процесса, связанной с кратковременной осадкой рельефа, неизбежно требует оптимизации ввода электрической энергии в межэлектродную зону за счет использования обратных связей по таким параметрам, как мощность тепловложения, перемещение подвижного электрода и усилие сжатия электродов, что предполагает применение более универсальной пускорегулирующей аппаратуры, позволяющей реализовывать адаптивное управление процессом сварки непосредственно в ходе ее протекания [216–219]. Главной задачей такого управления является обеспечение стабильного высокого качества формируемых сварных соединений без прерывания технологического цикла.

Иллюстрацией адаптивного управления является предложенный способ контактной рельефной сварки с коррекцией мощности тепловложения в межэлектродную зону. На циклограмме способа (рисунок 7.28) отображаются мощность тепловложения P , усилие сжатия F и перемещение подвижного электрода $h_{ЭЛ}$.

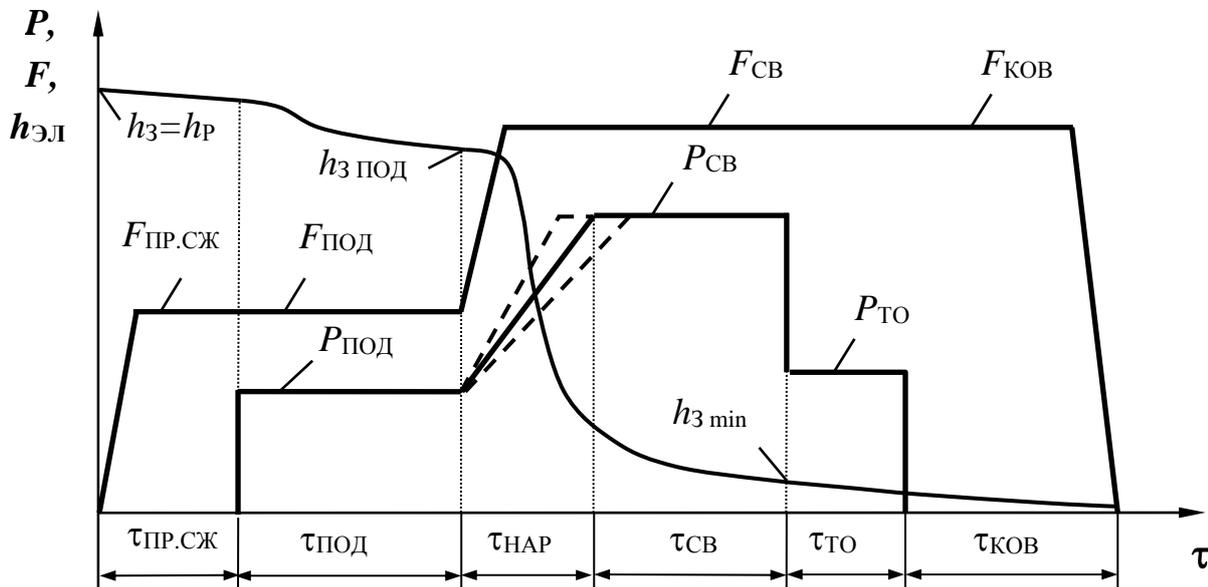


Рисунок 7.28 – Циклограмма способа контактной рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью тепловложения в межэлектродную зону

Так как величина $h_{ЭЛ}$ сама по себе не имеет четких ориентиров, для ее конкретизации в пространстве требуется выбрать начальную точку отсчета. Наиболее удобным вариантом выбора является момент касания электрода и

детали при предварительном сжатии $F_{\text{пр.сж}}$, при этом начальная точка определяется высотой зазора, равной высоте рельефа: $h_3 = h_p$. По истечении времени предварительного сжатия высота рельефа h_p несколько уменьшается, что определяется либо увеличением контактной площадки между рельефом и деталью под воздействием усилия сжатия, либо степенью внедрения рельефа в деталь (см. рисунки 4.13 и 4.17).

При включении начального сварочного тока подогрева $I_{\text{под}}$ начинает действовать корректирующая система регулирования мощности (см. рисунок 7.17). Время измерения параметров режима рельефной сварки $\tau_{\text{изм}}$ совпадает со временем включения тиристоров λ и производится в течение каждого полупериода сетевого напряжения (см. рисунок 6.11).

Мощность тепловложения $P_{\text{под}}$ и усилие $F_{\text{под}}$ при подогреве оказывают решающее влияние на степень разогрева контакта деталь–деталь. Эти величины связаны между собой таким образом: уменьшение усилия $F_{\text{под}}$ требует пропорционального снижения подводимой мощности $P_{\text{под}}$ для регулирования степени разогрева контактов и избежания выплесков. Поэтому в системе происходит периодический замер усилия $F_{\text{под}}$ (см. рисунок 7.15), на основании которого корректируется заданная табличная мощность $P_{23\text{ад}}$ введением коэффициента пропорциональности $k_{\text{сж}}$, то есть $P_{\text{под}} = k_{\text{сж}} \cdot P_{23\text{ад}}$.

При подогреве происходит перемещение электрода до момента достижения высоты зазора h_3 под. Эту величину можно использовать для определения момента начала нарастания мощности и усилия сжатия (см. рисунок 7.28).

Время нарастания мощности $\tau_{\text{нар}}$ должно согласовываться с характером перемещения верхнего электрода (см. рисунок 4.10, б). Для этих целей может использоваться датчик перемещения ДП, который с помощью преобразователя сигнала перемещения ПСП воздействует на заданное значение мощности тепловложения $P_{23\text{ад}}$ через коэффициент $K_{\text{д.п}}$ (см. рисунок 7.1). Поэтому время нарастания мощности $\tau_{\text{нар}}$ может изменяться в зависимости от скорости деформации рельефа (см. рисунок 7.28). Но в любом случае время $\tau_{\text{нар}}$ должно быть больше времени нарастания усилия сжатия электродов до максимального значения $F_{\text{св}}$, необходимого для введения в зону сварки максимальной мощности тепловложения $P_{\text{св}}$, иначе вероятность появления выплесков значительно повысится.

Еще одним решающим фактором, резко снижающим появление выплесков, является плавный переход от мощности при подогреве $P_{\text{под}}$ к максимальной мощности $P_{\text{св}}$. Дело в том, что при использовании циклограммы с паузой между токами подогрева $I_{\text{под}}$ «Нагрев 1» и сварочным $I_{\text{св}}$ «Нагрев 2» (см. рисунки 4.3 и 4.4) при включении позиции «Нагрев 2» возникает значительный бросок намагничивающего тока в первичной цепи сварочного

трансформатора, что неизбежно приводит к повышению мощности $P_{\text{СВ}}$ в течение нескольких начальных периодов протекания тока $I_{\text{СВ}}$ [198]. Плавное нарастание мощности без паузы полностью исключает бросок намагничивающего тока.

Основным препятствием, усложняющим аппаратуру, предназначенную для измерения мощности тепловложения, является необходимость располагать провода, снимающие напряжение с электродов $и_{\text{ЭЭ}}$, вдоль токоведущих частей сварочной машины. ЭДС, возникающая в проводах, пропорциональна скорости изменения магнитного потока и иногда превышает напряжение $и_{\text{ЭЭ}}$, которое имеет низкий уровень 1,5...2 В.

При использовании преобразователя напряжения NI-USB 6251 (DAQ-устройства сбора данных серии М) данная проблема решается за счет подключения датчика напряжения $и_{\text{ЭЭ}}$ на аналоговый вход по дифференциальной схеме (DIFF). Дифференциальные схемы подключения сигналов снижают уровень паразитных наводок и увеличивают коэффициент ослабления синфазной помехи. Кроме того, эти схемы позволяют измерять входные сигналы с большим уровнем синфазных помех, соответствующим пределам, допустимым для инструментального усилителя [212].

В процессе пропускания тока в течение времени $\tau_{\text{СВ}}$ нельзя допускать, чтобы зазор h_3 стал равным нулю. В этом случае между свариваемыми деталями возникает касание по увеличенной площади и происходит протекание тока по данной площади, т. е. его шунтирование. Вследствие этого плотность тока в зоне сварной точки снижается, рост ее прекращается и образуется непровар [4].

Если в момент выключения сварочного тока $h_3 > 0$, то возможна проковка сварного соединения при повышенном значении ковочного усилия, способствующая снижению остаточных растягивающих напряжений и росту циклической прочности.

Основное условие оптимального хода процесса рельефной сварки можно сформулировать так: зазор между деталями, равный сумме изменяющихся во время протекания тока высоты рельефа и местного теплового расширения деталей, должен быть больше некоторой минимально допустимой величины $h_{3 \text{ min}}$, необходимой для предотвращения соприкосновения деталей по большой площади. Таким образом, достижение минимального зазора $h_{3 \text{ min}}$, определяемого по графику перемещения электрода, является сигналом перехода от сварки к термообработке, которая осуществляется за время $\tau_{\text{ТО}}$ мощностью $P_{\text{ТО}}$ (см. рисунок 7.28). Во многих случаях термообработка может отсутствовать.

После выключения тока происходит проковка сварного соединения повышенным усилием сжатия $F_{\text{КОВ}}$ в течение времени $\tau_{\text{КОВ}}$, и процесс сварки завершается.



Таким образом, на основании проведенных исследований был предложен новый способ контактной рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью тепловложения, позволяющий получать сварные соединения стабильно высокого качества без прерывания технологического цикла.

Выводы

Разработана структурная схема аппаратной части корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения, включающая следующие компоненты: терминал управления (персональную ЭВМ), модульный аналого-цифровой и цифроаналоговый измерительный преобразователь напряжений NI-USB 6251, блок управления тиристорами БУСТ2, блок питания и согласования напряжений, машину контактной сварки с исполнительными устройствами, органами управления и датчиками обратной связи, программируемый логический контроллер ПЛК 160, преобразователь линейного перемещения подвижного электрода ЛИР-17, тензорезисторы типа 1-LY15-10/120 для измерения усилия сжатия электродов, модуль аналогового ввода сигналов тензодатчиков MB110.

Разработан программный код корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке в среде LabVIEW, осуществляющий нажатием на педаль сварочной машины запуск блока цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки, а также включением сварочного тока после отсчета предварительного сжатия путем задания напряжения управления U_y для блока БУСТ2 и угла открытия тиристорov α .

Предложен новый способ контактной рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью тепловложения в межэлектродную зону, позволяющий получать сварные соединения стабильно высокого качества без прерывания технологического цикла.

Оптимизация ввода электрической энергии осуществляется за счет использования корректирующей системы регулирования мощности тепловложения в зависимости от заданной табличной мощности $P_{23АД}$. При этом мощность тепловложения при подогреве $P_{ПОД}$ корректируется пропорционально усилию сжатия при подогреве $F_{ПОД}$ введением коэффициента пропорциональности $k_{СЖ}$, т. е. $P_{ПОД} = k_{СЖ} \cdot P_{23АД}$, с целью регулирования степени разогрева контакта между свариваемыми деталями. Момент начала нарастания мощности и усилия сжатия определяется перемещением подвижного электрода

при подогреве до момента достижения высоты зазора между деталями значения $h_{з\text{ под}}$. Плавный переход от мощности подогрева $P_{\text{под}}$ к мощности сварки $P_{\text{св}}$ осуществляется за время нарастания $\tau_{\text{нар}}$, которое согласовывается с перемещением верхнего электрода и скоростью деформации рельефа через коэффициент датчика перемещения $K_{\text{д.п.}}$. Сигналом перехода от мощности сварки $P_{\text{св}}$ к мощности термообработки $P_{\text{то}}$ является достижение минимального зазора $h_{з\text{ min}}$, определяемого датчиком перемещения электрода.



Заключение

Разработаны новые термомодеформационные циклы контактной точечной и рельефной сварки, повышающие работоспособность и точность геометрических параметров получаемых сварных соединений.

Разработаны методика моделирования процесса контактной рельефной сварки в программном обеспечении ANSYS и алгоритм процедуры пошагово-совмещенного расчета, включающий подготовительный этап моделирования, процедуры термоэлектрического и механического анализа, для исследования кинетики формирования сварных соединений при контактной точечной и рельефной сварке.

Разработан технологический процесс контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения, позволяющий снизить деформации на лицевых поверхностях изделий на 40...50 % по сравнению со сваркой без обжатия, исключить появление внутренних выплесков расплавленного металла и соблюсти требуемые размеры литого ядра и пластического пояса сварной точки. Углубление на поверхности детали со стороны электрода с увеличенной рабочей поверхностью после проковки при этом составляет лишь 0,5...2 % от толщины детали.

Влияние процесса обжатия периферийной зоны соединения на прочность сварного соединения заключается в том, что приложение усилия проковки $F_{\text{КОВ}}$ к кольцевому пуансону существенно меняет картину распределения остаточных напряжений в зоне соединения. При сварке в металле межэлектродного пространства создается напряженно-деформированное состояние, препятствующее деформации в радиальном и осевом направлениях и увеличивающее сопротивление пластическому течению металла из зоны сварного соединения к периферии сварной точки.

Разработан технологический процесс сварки «острой гранью» бобышки с внутренней резьбой с пластиной, позволяющий снизить деформации внутренней стенки бобышки, обеспечить стабильность прочностных показателей сварных соединений за счет минимизации зазоров между свариваемыми деталями и полной осадки рельефа на всю его высоту, сохранить резьбовое отверстие бобышки проходным и улучшить товарный вид изделия. Даны технологические рекомендации по выбору параметров режима рельефной сварки «острой гранью» в зависимости от диаметра резьбы бобышки d_0 при толщине листа $\delta = 2$ мм.

Теоретически обоснован выбор формы и размеров рельефов для сварки стержней с листовыми деталями из низкоуглеродистых сталей. Предложена методика расчета величины сварочного тока в зависимости от диаметра привариваемого стержня и толщины листа. Даны практические рекомендации



по выбору параметров режима рельефной сварки стержней диаметром 5...20 мм с листом толщиной 2 мм.

Разработана система активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону, осуществляющая внешнее воздействие на аппаратуру управления контактной машины с целью независимого программного задания величины и длительности протекания сварочного тока и обеспечение введения в зону сварки точного количества электрической энергии для образования сварного соединения требуемых размеров и формы со стабильными прочностными характеристиками без прерывания технологического цикла сварки в режиме реального времени.

Разработан математический аппарат, позволяющий в процессе сварки в режиме реального времени рассчитывать коэффициент регулирования мощности тепловложения k_{Pn} в межэлектродную зону в текущем полупериоде сетевого напряжения. Вычисление коэффициента регулирования мощности k_{Pn+1} и угла открытия тиристорov α_{n+1} в следующем полупериоде сетевого напряжения базируется на измерении действующих значений вторичного тока I_2 и напряжения между электродами $U_{ЭЭ}$, длительности включенного состояния тиристорov λ_n в течение предыдущего полупериода и определении по аппроксимирующей зависимости коэффициента мощности $\cos\varphi$ контактной сварочной машины.

Разработаны структурная схема аппаратной части корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения и программный код в среде LabVIEW, осуществляющий нажатием на педаль сварочной машины запуск блока цикла сварки, который с помощью таймеров-счетчиков отсчитывает интервалы времени предварительного сжатия, сварки, проковки, паузы, управляет включением катушек электропневмоклапанов сжатия и проковки, а также включением сварочного тока после отсчета предварительного сжатия путем задания напряжения управления U_y и угла открытия α тиристорного контактора.

Предложен новый способ контактной рельефной сварки с адаптивным управлением, позволяющий получать сварные соединения стабильно высокого качества без прерывания технологического цикла. Оптимизация ввода электрической энергии в каждом полупериоде тока осуществляется за счет использования корректирующей системы регулирования мощности тепловложения в зависимости от заданной табличной мощности P_{23AD} и измеренных значений тока I_2 , напряжения $U_{ЭЭ}$, длительности включения тиристорov λ , усилия сжатия электродов $F_{СВ}$ и величины перемещения подвижного электрода $h_{ЭЛ}$ в предыдущем полупериоде тока.



Список литературы

- 1 **Орлов, Б. Д.** Технология и оборудование контактной сварки: учебник для машиностроительных вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев; под общ. ред. Б. Д. Орлова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 352 с.
- 2 **Гуляев, А. И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве / А. И. Гуляев. – Москва: Машиностроение, 1978. – 246 с.
- 3 **Золотарев, Б. Б.** Деформации при точечной и шовной сварке и их устранение / Б. Б. Золотарев. – Москва: Машиностроение, 1975. – 39 с.
- 4 **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением: учебное пособие / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
- 5 **Федотов, Б. В.** Сварочное производство. Сварка давлением: учебное пособие / Б. В. Федотов, К. А. Охапкин. – Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2015. – 45 с.
- 6 Сварка в самолетостроении / Г. А. Кривов, В. Р. Рябов, А. Я. Ищенко, Р. В. Мельников, А. Г. Чаюн; под общ. ред. Б. Е. Патона. – Киев: МИИВЦ, 1998. – 695 с.
- 7 Способ контактной точечной сварки: пат. SU 1756067 / С. Н. Козловский, А. А. Чакалев, А. Н. Липин, О. Г. Юрин. – Оpubл. 23.08.1992.
- 8 **Катаев, Р. Ф.** Теория и технология контактной сварки: учебное пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Екатеринбург: Урал. ун-т, 2015. – 144 с.
- 9 **Козловский, С. Н.** Контактная точечная сварка с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский // Сварочное производство. – 1991. – № 1. – С. 4–7.
- 10 Точечная сварка с приложением дополнительного усилия сжатия к периферийной зоне соединения / Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, А. П. Найденов, О. Г. Юрин // Сварочное производство. – 1975. – № 12. – С. 13–15.
- 11 **Тумаков, С. Ф.** Повышение выносливости контактных точечных соединений локальным пластическим обжатием / С. Ф. Тумаков // Сварочное производство. – 1981. – № 2. – С. 17–19.
- 12 Способ контактной точечной сварки деталей разной толщины: пат. SU 1186431 / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, В. Д. Ковтун, В. М. Порукевич. – Оpubл. 23.10.1985.
- 13 **Козловский, С. Н.** Электродные устройства для контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский // Сварочное производство. – 1990. – № 4. – С. 5–8.
- 14 **Козловский, С. Н.** Устройство для реализации циклов контактной точечной сварки с программированием усилия обжатия периферийной зоны /



С. Н. Козловский, В. И. Малимонов, Г. П. Царьков // Сварочное производство. – 1987. – № 8. – С. 8–9.

15 Электродное устройство для контактной точечной сварки: пат. SU 2000906 / В. В. Десятник, В. П. Березиенко, С. Н. Емельянов. – Оpubл. 15.10.1993.

16 Устройство для контактной точечной сварки: пат. SU 1098716 / В. И. Рязанцев, Б. Д. Орлов. – Оpubл. 23.06.1984.

17 Способ контактной точечной сварки и электрод для его осуществления: пат. SU 1609577 / С. Н. Козловский, В. Г. Угрюмов. – Оpubл. 30.11.1990.

18 Электрод для контактной точечной сварки: пат. SU 479591 / А. П. Найденов, Н. С. Ипатов, И. П. Соколов, Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, О. Г. Юрин. – Оpubл. 05.08.1975.

19 Электродный узел для контактной точечной сварки: пат. ВУ 4660 / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, И. В. Тарасенко, С. М. Килессо. – Оpubл. 30.09.2002.

20 **Козловский, С. Н.** Основы теории и технологии контактной точечной сварки: монография / С. Н. Козловский. – Красноярск: СибГАУ, 2006. – 259 с.

21 **Банов, М. Д.** Технология и оборудование контактной сварки / М. Д. Банов. – Москва: Академия, 2008. – 224 с.

22 Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2000. – 848 с.

23 **ГОСТ 30021–93.** Конструкции сварные. Разряды точности. Предельные отклонения линейных размеров, допуски формы и расположения поверхностей. – Минск: Белстандарт, 1995. – 12 с.

24 **ГОСТ 24642–81.** Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. – 52 с.

25 **ГОСТ 28187–89.** Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерений. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.

26 **Козлов, И. К.** Область применения и оптимизация технологии рельефной Т-образной сварки / И. К. Козлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11-5. – С. 875–879.

27 **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 152 с.

28 **Рязанцев, В. И.** Технологические основы контактной сварки легких сплавов: учебное пособие для вузов / В. И. Рязанцев, В. В. Овчинников. – Москва: МГУИ, 2006. – 164 с.



29 **Березиенко, В. П.** Совершенствование технологии контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко, В. А. Попковский, С. Ф. Мельников. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 120 с.

30 Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве: справочное пособие / С. К. Павлюк, В. Г. Лупачев, В. М. Белоконь, В. П. Березиенко, А. Г. Лупачев, А. П. Ротач, В. В. Десятник, И. Н. Шибанов; под общ. ред. С. К. Павлюка. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 439 с.

31 **Hess, W. F.** A study of projection welding / W. F. Hess, W. J. Childs // *Welding Journal*. – 1947. – Vol. 27, № 12. – P. 712–723.

32 **Nippes, E. F.** Projection welding of 0.010 and 0.020-in. steel sheet / E. F. Nippes, J. M. Gerken, J. G. Maciora // *Welding Res. Suppl.* – 1950. – № 7. – P. 441–449.

33 **Nippes, E. F.** Projection welding of steel in heavy gages and in dissimilar thickness / E. F. Nippes, J. M. Gerken // *Welding Res. Suppl.* – 1952. – № 3. – P. 113–125.

34 **Harris, J. F.** Projection welding low carbon steel using embossed projection / J. F. Harris, J. J. Riley // *Welding Journal*. – 1961. – Vol. 40, № 4. – P. 363–376.

35 **Cunningham, A.** A fundamental study of projection welding using high speed photography / A. Cunningham, M. L. Begeman // *Welding Journal*. – 1965. – Vol. 44, № 8. – P. 381–384.

36 **Гельман, А. С.** Технология и оборудование контактной сварки / А. С. Гельман. – Москва: Машиностроение, 1960. – 368 с.

37 **Чулошников, П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов / П. Л. Чулошников. – Москва: Машиностроение, 1974. – 232 с.

38 **Каракозов, Э. С.** Особенности образования соединения при контактной рельефной сварке «острой гранью» / Э. С. Каракозов, А. И. Попов, В. В. Мартинович // *Сварочное производство*. – 1985. – № 12. – С. 10–12.

39 Влияние деформации и ее скорости на процесс рекристаллизации при контактной сварке «острой гранью» / Э. С. Каракозов, А. П. Терновский, А. И. Попов, В. В. Мартинович, А. В. Акимочкин // *Сварочное производство*. – 1987. – № 8. – С. 39–41.

40 **Березиенко, В. П.** Теоретические и технологические основы повышения несущей способности соединений, выполненных контактной точечной и рельефной сваркой, регулированием их напряженно-деформированного состояния: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.06 / В. П. Березиенко. – Могилев, 1997. – 345 л.

41 **Березиенко, В. П.** Некоторые пути повышения качества сварных соединений, выполненных контактной рельефной сваркой / В. П. Березиенко,



В. И. Майбуров, А. А. Жебровский // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении: материалы науч.-техн. конф. – Калуга: Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. 1984. – С. 10–11.

42 **Липа, М.** Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. – Киев: Техника, 1971. – 324 с.

43 Способ рельефной сварки трубной заготовки с листом: пат. SU 1107983 / Л. Ф. Лапинский, И. Е. Юдин. – Оpubл. 15.08.1984.

44 Способ контактной рельефной двухконтурной сварки штуцера с корпусом: пат. RU 2399469 / Н. В. Пасечник, Б. А. Сивак, А. Ф. Новицкий, Г. М. Крюков. – Оpubл. 20.09.2010.

45 Способ контактной рельефной сварки: пат. SU 1318363 / Л. С. Сергеев. – Оpubл. 23.06.1987.

46 **Моравский, В. Э.** Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки / В. Э. Моравский, Д. С. Ворона. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.

47 **Поляков, А. Ю.** О формировании ступенчатых соединений при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 62–69.

48 Оптимизация количества энергии, вводимой в зону рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, В. П. Березиенко, С. И. Лялихов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 67–77.

49 **Поляков, А. Ю.** Методика расчета параметров режима рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Донбас. машиностр. акад. – 2012. – № 3. – С. 226–231.

50 **Поляков, А. Ю.** Разработка технологического процесса контактной рельефной сварки пакетных соединений засовов замков / А. Ю. Поляков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 56–67.

51 **Поляков, А. Ю.** Оптимизация количества энергии, вводимой в зону рельефной сварки ступенчатых соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Технологии дуговой и контактной сварки в современной промышленности: материалы 5 Междунар. науч.-техн. семинара. – Санкт-Петербург: Ин-т сварки России, 2012. – С. 40–45.

52 Разработка энергосберегающего способа контактной рельефной сварки многослойных сварных конструкций / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, А. М. Курленков // Сварочное производство. – 2017. – № 1. – С. 14–20.

53 **Совгира, Ю. Д.** Рельефная сварка пакетов статоров асинхронных электродвигателей / Ю. Д. Совгира, Л. Д. Веретник // Сварочное производство. – 1973. – № 12. – С. 35–36.

54 **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.



55 **Николаев, Г. А.** Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – Москва: Машиностроение, 1971. – 760 с.

56 **Подола, Н. В.** Рельефная сварка многослойных пакетов из электро-технической стали / Н. В. Подола, В. Д. Щеглов // Сварочное производство. – 1975. – № 10. – С. 51–55.

57 **Колосов, В. И.** Совершенствование технологии контактной точечной сварки / В. И. Колосов, Р. А. Мусин, А. И. Садилов // Вестн. Перм. гос. техн. ун-та. Сварка. – Пермь: ПГТУ, 2002. – С. 200–210.

58 **Trommer, G.** Resistance spot welding using continuous tape / G. Trommer // Welding Journal. – 2009. – № 12. – P. 20–22.

59 Имитация контактной точечной сварки сталей с помощью программного обеспечения SPOTSIM / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, Р. А. Кудинов, У. Дилтей, Х.-К. Больманн // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 3–8.

60 **Киселев, С. Н.** Современные аспекты компьютерного моделирования тепловых, деформационных процессов и структурообразования при сварке и сопутствующих технологиях / С. Н. Киселев, А. С. Киселев, А. С. Куркин // Сварочное производство. – 1998. – № 10. – С. 16–22.

61 **Орлов, Б. Д.** Термодеформационные процессы при формировании точечного сварного соединения / Б. Д. Орлов, С. Н. Козловский, А. А. Чакалев // Сварочное производство. – 1981. – № 12. – С. 1–2.

62 **Чакалев, А. А.** Совершенствование термодеформационной модели контактной точечной сварки / А. А. Чакалев, А. Н. Прохоров // Сварочное производство. – 1989. – № 4. – С. 29–32.

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

64 **Huh, H.** Electrothermal analysis of electric resistance spot welding processes by a 3-D finite element method / H. Huh, W. Kang // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 63, № 1–3. – P. 672–677.

65 **Nied, H. A.** The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process / H. A. Nied // Welding Journal. – 1984. – № 3. – P. 123–132.

66 **Dong, P.** Finite Element Analysis of Electrode Wear Mechanisms: Face Extrusion and Pitting Effects / P. Dong, M. V. Li, M. Kimchi // Science and Technology of Welding and Joining. – 1998. – № 2. – P. 59–64.

67 **Sun, X.** Analysis of aluminum research spot welding process using coupled finite element procedure / X. Sun, P. Dong // Weld Res Supplement. – 2000. – № 5. – P. 215–221.

68 **Calva, C. M.** Enhancement of the Weldability in Resistance Welding / C. M. Calva, T. W. Eagar // AWS Detroit Section Sheet Metal Welding Conference IV, Southfield. – 1990. – P. 34–37.



69 **Feng, Z.** An incrementally coupled electrical–thermal–mechanical model for resistance spot welding / Z. Feng, S. S. Gould, M. L. Babu // 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, 1–5 June. – 1998. – P. 126–128.

70 **Sun, X.** Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses / X. Sun // Welding Journal. – 2000. – № 79 (9). – P. 244–251.

71 **Sun, X.** Effect of projection height of projection collapse and nugget formation – a finite element study / X. Sun // Welding Journal. – 2001. – № 9. – P. 211–216.

72 Numerical analysis of projection welding on auto-body sheet metal using a coupled finite element method / W.-F. Zhu, Z.-Q. Lin, X.-M. Lai, A.-H. Luo // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28, № 1–2. – P. 45–52.

73 **Жидков, А. В.** Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / А. В. Жидков. – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.

74 Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. Л. Солдусова, Н. А. Глазунова, И. Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

75 **Лукьянова, А. Н.** Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS: лабораторная работа / А. Н. Лукьянова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 52 с.

76 **Березиенко, В. П.** Об особенностях математического моделирования процесса контактной рельефной сварки листовых низкоуглеродистых сталей / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 23–27.

77 **Бендик, Т. И.** Особенности математического моделирования процесса Т-образной рельефной сварки / Т. И. Бендик // Сварка и родственные технологии: Респ. межведомств. сб. науч. тр., 2006. – № 8. – С. 9–13.

78 **Березиенко, В. П.** Перспективы использования математического моделирования для выбора технологических параметров процесса Т-образной рельефной сварки / В. П. Березиенко, Т. И. Бендик, С. М. Фурманов // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы 4 Междунар. науч.-техн. семинара, Санкт-Петербург, 23–25 окт. 2007 г. – Санкт-Петербург: ВиТ-Принт, 2008. – С. 54–59.

79 Электротермодеформационный расчёт процессов контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 77–85.



80 О кинетике образования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке «острой гранью» / В. П. Березиенко, Т. И. Бендик, С. М. Фурманов, И. Л. Скапцов // Сварка и родственные технологии: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – 2008. – № 10. – С. 85–90.

81 Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 21–26.

82 **Юманов, Д. Н.** Современные подходы к компьютерному моделированию процессов контактной рельефной сварки / Д. Н. Юманов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 130.

83 **Юманов, Д. Н.** О моделировании термоэлектрических процессов при контактной рельефной сварке / Д. Н. Юманов, С. М. Фурманов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 189.

84 **Zhang, H.** Resistance welding. Fundamentals and Applications / H. Zhang, J. Senkara. – New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 446 p.

85 Numerical methods in simulation of resistance welding / C. V. Nielsen, P. A. F. Martins, W. Zhang, N. Bay // VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering «COUPLED PROBLEMS 2015», International Center for Numerical Methods in Engineering. – 2015. – P. 1–13.

86 **Mikno, Z.** Projection Welding with Pneumatic and Servomechanical Electrode Operating Force Systems / Z. Mikno // Welding journal. – 2016. – Vol. 95, № 8. – P. 286–299.

87 Способ стабилизации сварочного тока при контактной сварке с тиристорным управлением: пат. SU 1355409 / Ф. А. Аксельрод, У. У. Ибрагимов, Ю. Е. Иоффе, Ю. И. Филиппов, Е. Н. Холмянский. – Оpubл. 30.11.1987.

88 Способ регулирования процесса электронагрева: пат. SU 404587 / Ю. М. Чернявский, Н. П. Помухин, Ю. В. Смoryго, В. Б. Яковлев. – Оpubл. 22.10.1973.

89 Устройство для управления процессом точечной контактной сварки: пат. SU 597526 / В. А. Ерофеев. – Оpubл. 15.03.1978.

90 Устройство для измерения активной мощности импульса сварочного тока: пат. SU 132350 / И. А. Розов, М. П. Зайцев. – Оpubл. 18.11.1960.

91 Способ регулирования процесса электронагрева при точечной и шовной сварке: пат. SU 662297 / А. С. Васильев, А. И. Комарчев, В. П. Стрельников, О. В. Белахов. – Оpubл. 15.05.1979.



92 Регулятор энергетического цикла сварки: пат. SU 1512736 / Л. Ф. Николаев, А. П. Химач. – Оpubл. 07.10.1989.

93 Способ управления процессом контактной точечной сварки: пат. SU 1281356 / В. Е. Атауш, В. П. Леонов, Э. В. Бумбиерис, Е. С. Луцук. – Оpubл. 07.01.1987.

94 Устройство для управления процессом контактной сварки: пат. SU 1113226 / Ю. А. Егоров. – Оpubл. 15.09.1984.

95 Electronic control system for a resistance welding station: pat. GB 2291227 / Barrachina Mir Ramon. – Publ. date 27.05.1998.

96 Стабилизатор процесса контактной сварки: пат. SU 1279776 / В. А. Ерофеев. – Оpubл. 30.12.1986.

97 Способ контроля и управления процессом контактной сварки: пат. SU 1816604 / В. П. Сидоров, С.М. Абросимов. – Оpubл. 23.05.1993.

98 **Герасимов, А. А.** Компьютерное управление процессом и стабилизация формирования соединений при контактной точечной сварке: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / А. А. Герасимов. – Волгоград, 2010. – 209 л.

99 Способ контроля и управления процессом контактной сварки: пат. SU 967729 / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. С. Гавриш, Ю. М. Таран, Т. Д. Сорокина, С. П. Никитин, В. А. Кривуляк. – Оpubл. 23.10.1982.

100 Способ регулирования контактной точечной сварки: пат. SU 647083 / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. А. Кривуляк, Н. А. Каришина, А. А. Урсатьев, В. С. Гавриш, А. Д. Попович. – Оpubл. 15.02.1979.

101 **Гладков, Э. А.** Автоматизация сварочных процессов : учебник / Э. А. Гладков, В. Н. Бродягин, Р. А. Перковский. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 421 с.

102 Control device for resistance welder: pat. US 6118095 / Yoshihiro Nagano. – Publ. date 12.09.2000.

103 Машина для контактной точечной сварки: пат. SU 1368133 / А. И. Потапов, С. С. Сергеев, И. А. Пенкина. – Оpubл. 23.01.1988.

104 Способ регулирования процесса контактной точечной сварки: пат. RU 2050237 / С. Н. Козловский, Г. И. Григоров, В. А. Казаков, М. А. Лубнин, А. А. Чакалев. – Оpubл. 20.12.1995.

105 Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum / М. Нао, К. А. Osman, D. R. Boome, C. J. Newton // Welding Journal. – 1996. – Vol. 75 (1). – P. 1–8.

106 **Ji, C. T.** Dynamic electrode force and displacement in resistance spot welding of aluminum / С. Т. Ji, Y. Zhou // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. – Vol. 126, № 3. – P. 605–610.

107 Review on Techniques for On-Line Monitoring of Resistance Spot Welding Process / Yanhua Ma, Pei Wu, Chuanzhong Xuan, Yongan Zhang //



Advances in Materials Science and Engineering. – 2013. – Article ID 630984. – P. 1–6.

108 **Роговин, Д. А.** О контроле качества точечной сварки низкоуглеродистых сталей средних толщин по величине перемещений верхнего электрода / Д. А. Роговин, В. П. Александров // Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 35–37.

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

110 Method for checking a spot welded portion and spot welding machine: pat. US 5194709 / W. Ichikawa, Y. Matsuki, S. Hirihashi. – Publ. date 16.03.1993.

111 Monitoring resistance welding: pat. GB 2055318 / J. Defourny. – Publ. date 04.03.1981.

112 Способ контроля процесса контактной точечной сварки: пат. SU 1771908 / С. Н. Козловский, А. А. Чакалев. – Оpubл. 30.10.1992.

113 Машина для контактной сварки: пат. SU 287726 / Ф. А. Аксельрод, А. Г. Зильберг. – Оpubл. 24.05.1972.

114 Spot welding control system and control method: pat. US 6232572 / M. Kanjo. – Publ. date 15.05.2001.

115 Electrode displacement monitoring and control: pat. US 5393950 / M. Killian. – Publ. date 28.02.1995.

116 Resistance welding control method: pat. US 6903298 / P. Wang, R. Thornton, K. Schmidt, S. Marin. – Publ. date 07.06.2005.

117 Inter-electrode displacement monitoring and control: pat. US 5558785 / M. L. Killian, M. D. Orr. – Publ. date 24.09.1996.

118 System for and method of controlling resistance welder: pat. US 5483035 / S. Kawai, K. Sahashi. – Publ. date 09.01.1996.

119 Способ регулирования и контроля процесса контактной сварки: пат. RU 2164846 / Н. П. Горун, В. М. Куликов, С. П. Манейкин, П. М. Руденко, В. М. Ягнятинский. – Оpubл. 10.04.2001.

120 Способ управления сварочным током при контактной точечной сварке: пат. RU 2309030 / А. С. Климов, А. А. Герасимов, Н. П. Анциборов, М. С. Гончаров. – Оpubл. 27.10.2007.

121 **Руденко, П. М.** Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02 / П. М. Руденко, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2007. – № 11. – С. 43–45.



122 **Гавриш, В. С.** Система автоматического управления и контроля контактной точечной сварки / В. С. Гавриш, П. М. Руденко, Н. В. Подола // Автоматическая сварка. – 2008. – № 9. – С. 54–57.

123 **Руденко, П. М.** Портативная система контроля и управления процессом контактной точечной сварки / П. М. Руденко, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2010. – № 2. – С. 36–40.

124 **Кудинов, Р. А.** Разработка компьютерной системы математического моделирования и проектирования технологии контактной точечной сварки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Р. А. Кудинов. – Тула, 1998. – 118 л.

125 Modeling of resistance spot welding nugget growth / C. L. Tsai, O. A. Jammal, C. Papritan, D. W. Dickinson // Welding Journal. – 1992. – Vol. 71(2). – P. 47–54.

126 **Murakawa, H.** Weldability Analysis of Spot Welding on Aluminium using FEM / H. Murakawa, F. Kimura, Y. Ueda // Mathematical Modeling of Weld Phenomena. – P. 944–966.

127 **Khan, J. A.** Prediction of nugget development during resistance spot welding using coupled thermal-electrical-mechanical model / J. A. Khan, L. Xu, Y.-J. Chao // Science and Technology of Welding and Joining. – 1999. – Vol. 4(4). – P. 201–207.

128 Study on Nugget Development in RSW Process with Flat Tip Cylindrical Electrode / S. Shafee, B. Balu Naik, K. Sammaiah, M. Mohinoddin // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). – 2014. – Vol. 11, iss. 5. – P. 9–17.

129 **Chang, B. H.** Comparative study of small scale and large scale resistance spot welding / B. H. Chang, M. V. Li, Y. Zhou // Science and Technology of Welding and Joining. – 2001. – Vol. 6, № 5. – P. 273–280.

130 **Колосков, М. М.** Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосков, Е. Т. Долбенко, Ю. В. Каширский; под общ. ред. А. С. Зубченко. – Москва: Машиностроение, 2001. – 672 с.

131 **Николаев, А. К.** Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – Москва: Metallurgy, 1978. – 96 с.

132 **Зиновьев, В. Е.** Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – Москва: Metallurgy, 1989. – 382 с.

133 **Северденко, В. П.** Механические свойства сталей, деформированных в широком интервале температур / В. П. Северденко. – Минск: Наука и техника, 1974. – 64 с.

134 **Williams, N. T.** Review of resistance spot welding of steel sheets. Part 1 Modelling and control of weld nugget formation / N. T. Williams, J. Parker // International Materials Reviews. – 2004. – Vol. 49 (2). – P. 45–75.



135 **Andersson, O.** Prediction and Verification of Resistance Spot Welding Results of Ultra-High Strength Steels through FE Simulations / O. Andersson, A. Melander // *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. – 2015. – № 5. – P. 26–37.

136 **Zhang, H.** Resistance Welding: Fundamentals and Applications / H. Zhang, J. Senkara. – New York: Taylor & Francis Group, 2011. – 465 p.

137 **Говорков, В. А.** Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – Москва: Энергия, 1968. – 488 с.

138 **Boriwal, L.** Review on modeling of resistance spot welding process / L. Boriwal, R. M. Sarviya, M. M. Mahapatra // *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*. – 2015. – Vol. 9 (2). – P. 154–159.

139 Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model / J. Wang, H.-P. Wang, F. Lu, B. E. Carlson, D. R. Sigler // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 89. – P. 1061–1072.

140 Numerical simulation of resistance spot welding of Al to zinc-coated steel with improved representation of contact interactions / Z. Wan, H.-P. Wang, M. Wang, B. E. Carlson, D. R. Sigler // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 101. – P. 749–763.

141 **Кутателадзе, С. С.** Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва: Атомиздат, 1979. – 416 с.

142 **Дульнев, Г. Н.** Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Ленинград: Энергия, 1968. – 326 с.

143 **Попов, В. М.** Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. – Москва: Энергия, 1971. – 216 с.

144 **Хольм, Р.** Электрические контакты: пер. с англ. / Р. Хольм. – Москва: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.

145 **Vogler, M.** Electrical Contact Resistance under High Loads and Elevated Temperatures / M. Vogler, S. Sheppard // *Welding Journal*. – 1993. – P. 231–238.

146 **Ma, N.** Numerical and Experimental Study on Nugget Formation in Resistance Spot Welding for High Strength Steel Sheets in Automobile Bodies / N. Ma, H. Murakawa // *Joining and Welding Research Institute*. – 2009. – Vol. 38, № 2. – P. 19–24.

147 **Braunovic, M.** Electrical Contacts: Fundamentals, Applications, and Technology / M. Braunovic, N. K. Myshkin, V. V. Konchits. – New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 652 с.

148 Nugget Formation during Resistance Spot Welding using Finite Element Model / J. Saleem, A. Majid, K. Bertilsson, T. Carlberg, N. Ul Islam // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. – 2012. – Vol. 6, № 7. – P. 1228–1233.



149 **Можаровский, Н. С.** Теория пластичности и ползучести в инженерном деле / Н. С. Можаровский. – Киев: Вища школа, 1991. – 264 с.

150 **Мастеров, В. А.** Теория пластической деформации и обработка металлов давлением / В. А. Мастеров, В. С. Берковский. – Москва: Металлургия, 1976. – 352 с.

151 **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 423 с.

152 **Фурманов, С. М.** Контактная точечная сварка на лицевых поверхностях изделий / С. М. Фурманов, В. П. Березиенко. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 140 с.

153 **Фурманов, С. М.** Разработка процесса контактной точечной сварки, обеспечивающего уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / С. М. Фурманов. – Могилёв, 2005. – 162 л.

154 **Бендик, Т. И.** Рельефная сварка Т-образных соединений с направленной упругопластической деформацией металла: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Т. И. Бендик. – Могилёв, 2009. – 147 л.

155 **Соколовский, В. В.** Теория пластичности / В. В. Соколовский. – Москва: Высшая школа, 1969. – 608 с.

156 **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – Москва: Мир, 1979. – 392 с.

157 **Волченко, В. Н.** Теория сварочных процессов: учебник для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров; под общ. ред. В. В. Фролова. – Москва: Высшая школа, 1998. – 559 с.

158 **Зубчанинов, В. Г.** Основы теории упругости и пластичности / В. Г. Зубчанинов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 368 с.

159 **Быковцев, Г. И.** Теория пластичности / Г. И. Быковцев, Д. Д. Ивлев. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 528 с.

160 **Секулович, М.** Метод конечных элементов / М. Секулович. – Москва: Стройиздат, 1993. – 664 с.

161 **Березиенко, В. П.** Уменьшение глубины вмятин от электродов при контактной точечной сварке / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 20–26.

162 **Березиенко, В. П.** Пути снижения деформации лицевых поверхностей изделий при контактной точечной сварке / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов // Сварочные технологии и оборудование. – 2003. – № 3. – С. 16–27.

163 **Фурманов, С. М.** О разработке оборудования для контактной точечной сварки без вмятин на лицевых поверхностях изделий / С. М. Фурманов, В. П. Березиенко // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы 2 Междунар. науч.-практ. семинара. – Санкт-Петербург: Ин-т сварки России, 2005. – С. 15–20.



164 Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 23–28.

165 О влиянии условий охлаждения электродов на характер деформирования поверхностей деталей при точечной сварке / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, Е. Л. Воронов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 28–33.

166 **Ловшенко, Ф. Г.** Технологические свойства дисперсно-упрочненных медных материалов, получаемых с применением технологии реакционного механического легирования / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // Литьё и металлургия. – 2008. – № 4. – С. 134–139.

167 **Марукович, Е. И.** Износостойкие сплавы / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко. – Москва: Машиностроение, 2005. – 428 с.

168 **Козловский, С. Н.** Устройство для реализации циклов контактной точечной сварки с программированием усилия обжатия периферийной зоны / С. Н. Козловский, В. И. Малимонов, Г. П. Царьков // Сварочное производство. – 1987. – № 8. – С. 8–9.

169 **Козловский, С. Н.** Устройство для контактной точечной сварки с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский, Е. Г. Яшметов // Вестн. Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2006. – № 6 (13). – С. 93–97.

170 **Козловский, С. Н.** Основы теории и технологии контактной точечной сварки: монография / С. Н. Козловский. – Красноярск: СибГАУ, 2003. – 235 с.

171 **Козловский, С. Н.** Программирование усилия сжатия электродов при контактной точечной сварке / С. Н. Козловский // Сварочное производство. – 1990. – № 1. – С. 33–35.

172 **Фурманов, С. М.** Об упругопластическом деформировании металла при контактной точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения / С. М. Фурманов // Сварка и родственные технологии. – 2001. – № 4. – С. 33–37.

173 **Березиенко, В. П.** О снижении глубины вмятины от электродов на лицевых поверхностях изделий при контактной точечной сварке / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. – 2002. – № 1. – С. 16–21.



174 **Berezienko, V. P.** Reducing the depth of indentation from electrodes in resistance spot welding / V. P. Berezienko, S. M. Furmanov // *Welding International*. – 2004. – 18 (2). – С. 139–144.

175 **Berezienko, V. P.** Increasing the load-carrying capacity of spot welded joints in low-carbon steels / V. P. Berezienko, V. A. Popkovskii, S. M. Furmanov // *Welding International*. – 2000. – 14 (6). – С. 488–490.

176 **Березиенко, В. П.** О расчете силовых параметров режима точечной сварки с обжатием периферийной зоны / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2010. – № 4 (29). – С. 98–106.

177 **Козловский, С. Н.** Особенности расчета параметров силового воздействия на детали при точечной сварке с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский, В. И. Малимонов // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1989. – № 10. – С. 102–108.

178 Способ контактной точечной сварки: пат. ВУ 6959 / С. М. Фурманов, В. П. Березиенко. – Оpubл. 30.03.2005.

179 Методика программного управления процессом контактной точечной сварки / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, С. В. Болотов, Т. И. Бендик // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2010. – № 8. – С. 139–144.

180 Машина для контактной точечной сварки: пат. ВУ 9558 / И. В. Тарасенко, О. В. Дубинский, В. С. Зайковский, С. В. Болотов, С. М. Фурманов. – Оpubл. 30.08.2007.

181 **Березиенко, В. П.** Определение параметров режима контактной рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко, Т. И. Бендик // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2012. – № 4 (37). – С. 15–22.

182 **Березиенко, В. П.** О выборе параметров регулирования процесса рельефной Т-образной сварки / В. П. Березиенко // *Материалы Всесоюз. конф.* – Черкассы, 1977. – С. 12–13.

183 Система автоматического управления процессом рельефной сварки: пат. ВУ 10481 / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Короткевич, А. О. Булышко. – Оpubл. 30.12.2014.

184 **Поляков, А. Ю.** Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2013. – № 4. – С. 75–84.

185 Экспериментальное определение энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Б. В. Федотов, Д. Н. Юманов, М. С. Колобова // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2017. – № 1. – С. 74–83.



186 **Поляков, А. Ю.** Контактная рельефная сварка пакетных соединений с автоматическим регулированием параметров режима: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / А. Ю. Поляков. – Могилев, 2015. – 204 л.

187 LabVIEW Real-Time 8. Разработка приложений. Учебный курс National Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bookfi.net/book/715949>. – Дата доступа: 23.06.2019.

188 **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 240 с.

189 **Поляков, А. Ю.** Разработка технологического процесса контактной рельефной сварки засова замка сувальдного / А. Ю. Поляков, С. С. Короткевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных, Могилев, 30–31 окт. 2013 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 96.

190 Способ контактной точечной и/или рельефной сварки: пат. ВУ 19977 / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Короткевич, А. О. Булышко. – Оpubл. 30.04.2016.

191 **Рыськова, З. А.** Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.

192 **Глебов, Л. В.** Расчет и конструирование машин контактной сварки / Л. В. Глебов, Н. А. Пескарев, Д. С. Файгенбаум. – Ленинград: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 424 с.

193 **Глебов, Л. В.** Устройство и эксплуатация контактных машин / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 312 с.

194 О фазовом регулировании мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке / С. М. Фурманов, А. Ю. Поляков, Д. Н. Юманов, А. Н. Кухарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1. – С. 80–91.

195 **Патон, Б. Е.** Электрооборудование для контактной сварки. Элементы теории / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – Москва: Машиностроение, 1969. – 440 с.

196 Способ определения коэффициента мощности полнофазного включения тока при контактной точечной сварке однофазным током: пат. SU 1281358 / Ф. А. Аксельрод, У. У. Ибрагимов, Ю. Е. Иоффе, Ю. И. Филиппов, Е. Н. Холмянский. – Оpubл. 07.01.1987.

197 Способ измерения коэффициента мощности однофазной контактной сварочной машины: пат. SU 1310149 / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. С. Гавриш, В. И. Гейц. – Оpubл. 15.05.1987.

198 **Денисенко, Н. А.** Определение по осциллограммам эффективных значений токов и коэффициентов мощности машин для контактной сварки /



Н. А. Денисенко, И. А. Курило // Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 59–62.

199 Способ определения коэффициента мощности контактной сварочной машины: пат. RU 2424098 / А. С. Климов, А. В. Комиренко, В. С. Климов, А. Н. Анциборов. – Оpubл. 20.07.2011.

200 Аппаратная реализация корректирующей системы регулирования мощности тепловложения при контактной рельефной сварке / С. М. Фурманов, Б. В. Федотов, Д. Н. Юманов, И. Н. Смоляр // Сварка и Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 35–40.

201 Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учебное пособие / А. С. Климов, И. В. Смирнов, А. К. Кудинов, Г. Э. Кудинова. – Тольятти: ТГУ, 2007. – 260 с.

202 **Вержбицкий, В. М.** Основы численных методов: учебник для вузов / В. М. Вержбицкий. – Москва: Высшая школа, 2002. – 840 с.

203 **Амосов, А. А.** Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – Москва: Высшая школа, 1994. – 544 с.

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

205 **Шишмаков, И. А.** Аппаратура управления и контроля для контактной сварки / И. А. Шишмаков, М. Я. Левин, Д. К. Симо // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 33–36.

206 **Аксельрод, Л. Ф.** Микропроцессорные контроллеры для машин контактной сварки / Л. Ф. Аксельрод, Ю. Е. Иоффе, М. Н. Куперман // Сварочное производство. – 1990. – № 8. – С. 27–28.

207 **Подола, Н. В.** Компьютерная диагностика контактной сварки / Н. В. Подола, В. С. Гавриш, П. М. Руденко // Автоматическая сварка. – 1994. – № 7–8. – С. 32–35.

208 Resistance spot welder adaptive control: pat. GB 2122935 / R. K. Cohen. – Оpubл. 25.01.1984.

209 **Махненко, В. И.** Компьютеризация инженерной деятельности в сварке и родственных технологиях / В. И. Махненко // Сварочное производство. – 1994. – № 5. – С. 31–34.

210 **Подола, Н. В.** Компьютерная система типа РВК-100 управления машиной для контактной точечной сварки / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. И. Гейц // Автоматическая сварка. – 1991. – № 7. – С. 64–68.

211 Блок управления тиристорами и симисторами БУСТ2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://owen.by/izmeriteli-regulatory-pid-regulatory/regulatory-moshchnosti/blok-upravleniya-tiristorami-i-simistorami-bust2.html>. – Дата доступа: 23.06.2019.



212 Преобразователи напряжения измерительные аналого-цифровые и цифроаналоговые модульные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russia.ni.com/sites/default/files/Описание.pdf>. – Дата доступа: 23.06.2019.

213 ЛИР-17. Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи перемещений со штоком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://old.skbis.ru>. – Дата доступа: 23.06.2019.

214 Тензорезисторы для анализа напряженно-деформированных состояний. DY-тензорезисторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl-kinesis.by/p54187741-tenzorezistory.html>. – Дата доступа: 23.06.2019.

215 Модуль ввода сигналов тензодатчиков MB110-1ТД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://owen.by/moduli-vvoda-vyvoda/moduli-s-interfejsom-rs-485-mkh110/modul-vvoda-signalov-tenzodatchikov-mv110-1td.html>. – Дата доступа: 23.06.2019.

216 **Kas, Z.** An Electrothermal Model Based Adaptive Control of Resistance Spot Welding Process / Z. Kas, M. Das // *Intelligent Control and Automation*. – 2015. – Vol. 6, № 2. – P. 134–146.

217 **Cho, Y.** Advanced Resistance Spot Welding Technologies: New Machine, Adaptive Control and FEM Simulation / Y. Cho, I. Chang, H. Lee // *Materials Science Forum*. – 2008. – Vol. 580–582. – P. 367–370.

218 **Yu, J.** Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels / J. Yu // *Metals*. – 2018. – № 8 (10), 775. – P. 1–20.

219 Effect of Initial (Reference) Welding Current for Adaptive Control and It's Optimization to Secure Proper Weld Properties in Resistance Spot Welding / Md. Ashaduzzaman, I. D. Choi, J. W. Kim, D. G. Nam, Y. D. Park // *Journal of Welding and Joining*. – 2015. – Vol. 33, № 6. – P. 507–514.



Оглавление

Введение	3
1 Основные направления совершенствования термомодеформационных циклов контактной точечной и рельефной сварки	5
1.1 Способы уменьшения деформаций от электродов при точечной сварке на лицевых поверхностях изделий	5
1.2 Способы обеспечения точности геометрических параметров соединений, выполняемых рельефной сваркой	15
1.3 Повышение качества сварных соединений, получаемых рельефной сваркой в твердой фазе	19
1.4 Способы обеспечения прочности многослойных соединений, выполняемых точечной и рельефной сваркой	26
1.5 О необходимости математического моделирования термомодеформационных циклов сварки	31
1.6 Анализ существующих систем автоматического регулирования мощности и энергии тепловложения при контактной сварке	38
2 Математическое моделирование процесса термоупруго-пластического деформирования металла зоны соединения при контактной точечной и рельефной сварке	49
2.1 Пошагово-совмещенная математическая модель термомодеформационного цикла сварки на основе метода конечных элементов.....	49
2.2 Методика моделирования электрических и температурных полей в зоне сварного соединения	58
2.3 Моделирование процесса упругопластического деформирования металла зоны соединения	66
2.4 Специфика математического моделирования процесса рельефной сварки в программной среде ANSYS	72
3 Уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий регулированием термомодеформационного цикла точечной сварки	82
3.1 Механизм деформирования лицевых поверхностей изделий при двусторонней точечной сварке	82
3.2 Способы регулирования напряженно-деформированного состояния при применении с лицевой стороны изделия электрода с увеличенной рабочей поверхностью	88



3.3 Влияние термдеформационного цикла сварки с обжатием периферийной зоны соединения на деформации лицевых поверхностей изделий и прочность сварного соединения	94
3.4 Расчет параметров силового воздействия на детали при сварке с обжатием периферийной зоны	102
3.5 Разработка технологического процесса, обеспечивающего уменьшение деформаций лицевых поверхностей изделий, и оборудования для его реализации	109
4 Способы регулирования термдеформационного цикла рельефной сварки Т-образных сварных соединений	118
4.1 Влияние параметров термдеформационного цикла рельефной сварки «острой гранью» на прочностные показатели соединений	118
4.2 Методика определения параметров режима рельефной сварки «острой гранью» Т-образных сварных соединений	126
4.3 Методика определения параметров режима рельефной сварки Т-образных сварных соединений типа стержень–лист	135
5 Разработка технологического процесса рельефной сварки с автоматическим регулированием энергии тепловложения в межэлектродную зону	147
5.1 Разработка системы активного контроля энергии тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке	147
5.2 Кинетика упругопластического деформирования металла межэлектродной зоны при рельефной сварке многослойных соединений	160
5.3 Влияние усилия сжатия электродов на энергетические показатели процесса формирования многослойных соединений	166
5.4 Разработка технологического процесса рельефной сварки многослойных соединений и оснастки для его реализации	168
6 Разработка корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке	179
6.1 Фазовое регулирование переменного напряжения и тока при контактной сварке	179
6.2 Фазовое регулирование мощности во вторичном контуре сварочной машины	187



6.3 Расчетное определение коэффициента мощности контактной сварочной машины при автоматическом регулировании	196
6.4 Расчетное определение коэффициента регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону	203
6.5 Определение угла открытия тиристорov при автоматическом регулировании мощности тепловложения в зону сварки	205
7 Разработка компьютерной системы управления процессом контактной сварки	212
7.1 Использование компьютерного управления для регулирования процесса контактной точечной и рельефной сварки	212
7.2 Разработка аппаратной части корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения в межэлектродную зону при контактной сварке	215
7.3 Разработка программного кода корректирующей системы автоматического регулирования мощности тепловложения	230
7.4 Разработка способа рельефной сварки с адаптивным управлением мощностью тепловложения в зону соединения	240
Заключение	245
Список литературы.....	247



Научное издание

Фурманов Сергей Михайлович

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ
КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ**

Редактор *И. В. Голубцова*

Художественное оформление обложки *В. П. Бабичева*

Технический редактор *А. А. Подошевка*

Компьютерный дизайн *Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 09.09.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 16,6. Тираж 100 экз. Заказ № 589 .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

