

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

А. Ю. ПОЛЯКОВ

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

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



Могилёв
«Белорусско-Российский университет»
2019

УДК 621.791.763.2

Рекомендовано к изданию Советом Белорусско-Российского университета
«11» ноября 2018 г., протокол № 5

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., заслуж. деятель науки Республики Беларусь,
чл.-кор. НАН Беларуси, зав. кафедрой «Порошковая металлургия,
сварка и технология материалов» Белорусского национального
технического университета *Ф. И. Пантелеенко*;

д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой «Теория и технология сварки материалов»
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *С. Г. Паршин*;
д-р техн. наук, проф. *В. П. Березиенко*

Поляков, А. Ю.

Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки
[монография] / А. Ю. Поляков. – Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. –
209 с. : ил.

ISBN 978-985-492-213-3.

Монография посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме энергосбережения в сварочном производстве. Рассматривается контактная рельефная сварка как разновидность способов сварки давлением, все более часто применяемая вместо дуговых способов сварки негабаритных узлов в крупносерийном и массовом производстве ввиду высоких степени автоматизации, производительности и культуры производства. Особое внимание уделено возможности получения рельефных соединений с расплавлением металла свариваемых деталей и без его расплавления (в твердой фазе) путем реализации циклограмм нагрева межэлектродной зоны, отличных от рекомендуемых в литературе. Такой взгляд будет интересен студентам, инженерам и научным работникам по специальности «Сварка, родственные процессы и технологии».

УДК 621.791.763.2

ISBN 978-985-492-213-3

© Поляков А. Ю., 2019

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», 2019



Введение

Снижение энергоемкости производства является одним из приоритетных направлений развития промышленных комплексов Республики Беларусь и иностранных государств.

Современное импортное оборудование ведущих мировых производителей, все чаще используемое на отечественных предприятиях и имеющее высокие технические характеристики, отличается значительной закупочной стоимостью, что увеличивает сроки его окупаемости, особенно в условиях низких коэффициентов загрузки и сменности. В свою очередь, сварочное производство является весьма энергоемким и требует применения достаточно мощных высокоамперных установок.

За последние 40 лет благодаря развитию во всем мире инвертирующих технологий удалось существенно повысить коэффициенты мощности и полезного действия, а также снизить мощность, потребляемую из сети, для оборудования, использующегося при дуговых способах сварки плавлением и термической резке.

Однако в области сварки давлением подобных изменений не произошло. Оборудование, работающее на переменном и постоянном токе, до сих пор имеет в своем составе в качестве источников питания массивные сварочные трансформаторы, характеризующиеся значительным энергопотреблением. Кроме того, при изготовлении многих ответственных конструкций (например, элементов кузовов автомобилей) в условиях крупносерийного и массового производства контактные сварочные машины потребляют завышенное количество электроэнергии, т. к. такие основные параметры режима сварки, как величина сварочного тока и длительность его протекания, операторами обычно устанавливаются «с запасом» и в соответствии с представленными в различных источниках литературы рекомендациями многолетней давности, которые существенно разнятся между собой.

Ввиду вышеизложенного суть проводимых научных исследований должна сводиться к разработке и обоснованию таких параметров режима сварки, которые будут обеспечивать требуемую прочность сварных соединений при минимально возможном тепловложении в межэлектродную зону (энергосберегающие режимы).

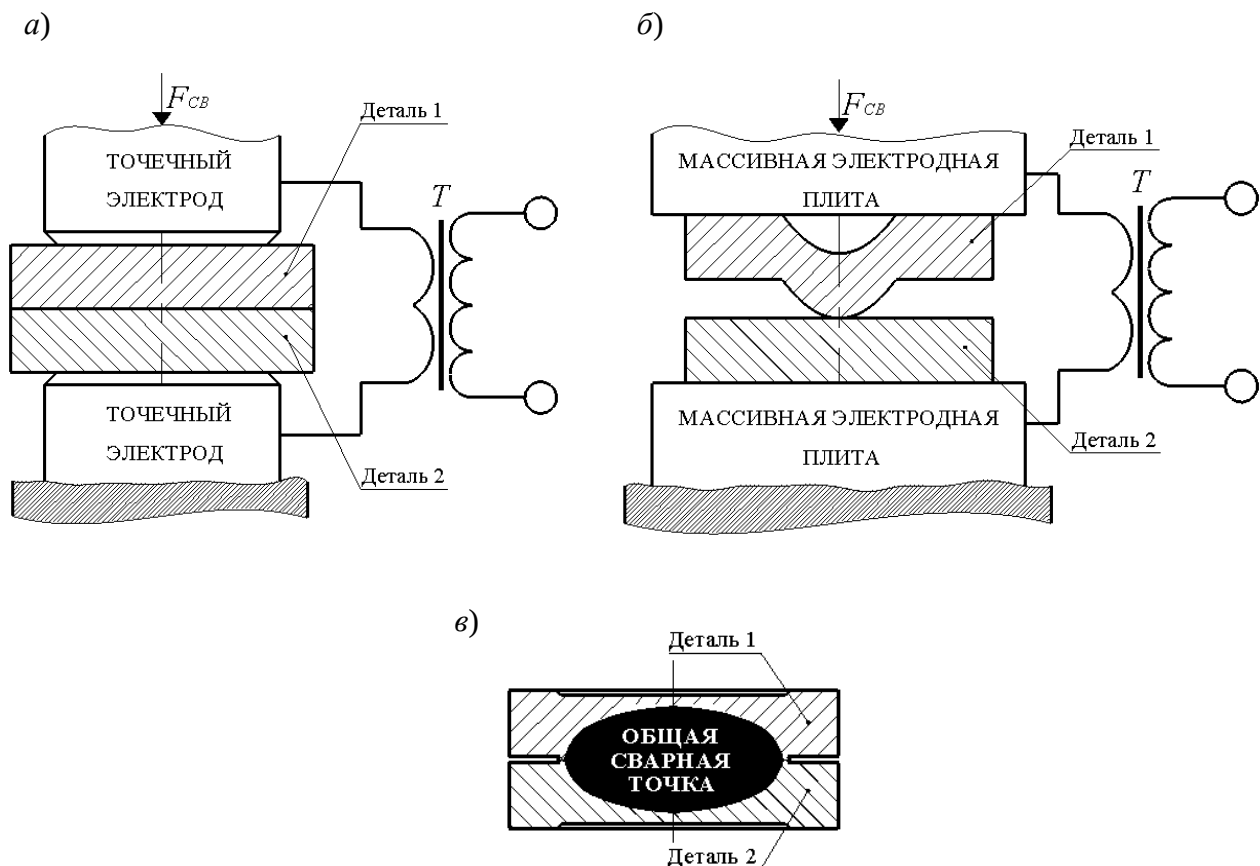
Сегодня благодаря интенсивному развитию приборостроения созданы различные аналого-цифровые устройства и датчики, позволяющие в режиме реального времени управлять сварочной машиной и, соответственно, кинетикой формирования сварных соединений. С помощью таких устройств, как наиболее производительных и легко поддающихся автоматизации, возможно снизить энергоемкость процессов контактной сварки, но только путем реализации нетипичных циклограмм нагрева металла межэлектродной зоны с итоговым формированием общей зоны взаимного расплавления металла свариваемых деталей или твердофазной зоны соединения металла свариваемых деталей (без расплавления).

1 Особенности процесса контактной рельефной сварки и идея снижения его энергоемкости

1.1 Контактная рельефная сварка (КРС) и области ее применения

Контактная рельефная сварка является разновидностью контактной точечной сварки (далее – КТС) и ее сущность заключается в том, что формирование неразъемного соединения деталей происходит в результате их сжатия электродами сварочной машины с выделением тепловой энергии в контактах деталь–деталь, электрод–деталь и основном металле при пропускании высокоамперных импульсов тока, причем на одной или на нескольких из деталей имеется естественный или искусственный выступ (рельеф) [1, 2].

Технологически процессы КРС и КТС различаются наличием/отсутствием рельефа, формой и габаритами электродов. При этом общим является конечный результат процесса – сварная точка (литая зона), общая для деталей и обеспечивающая прочность соединения (рисунок 1.1).



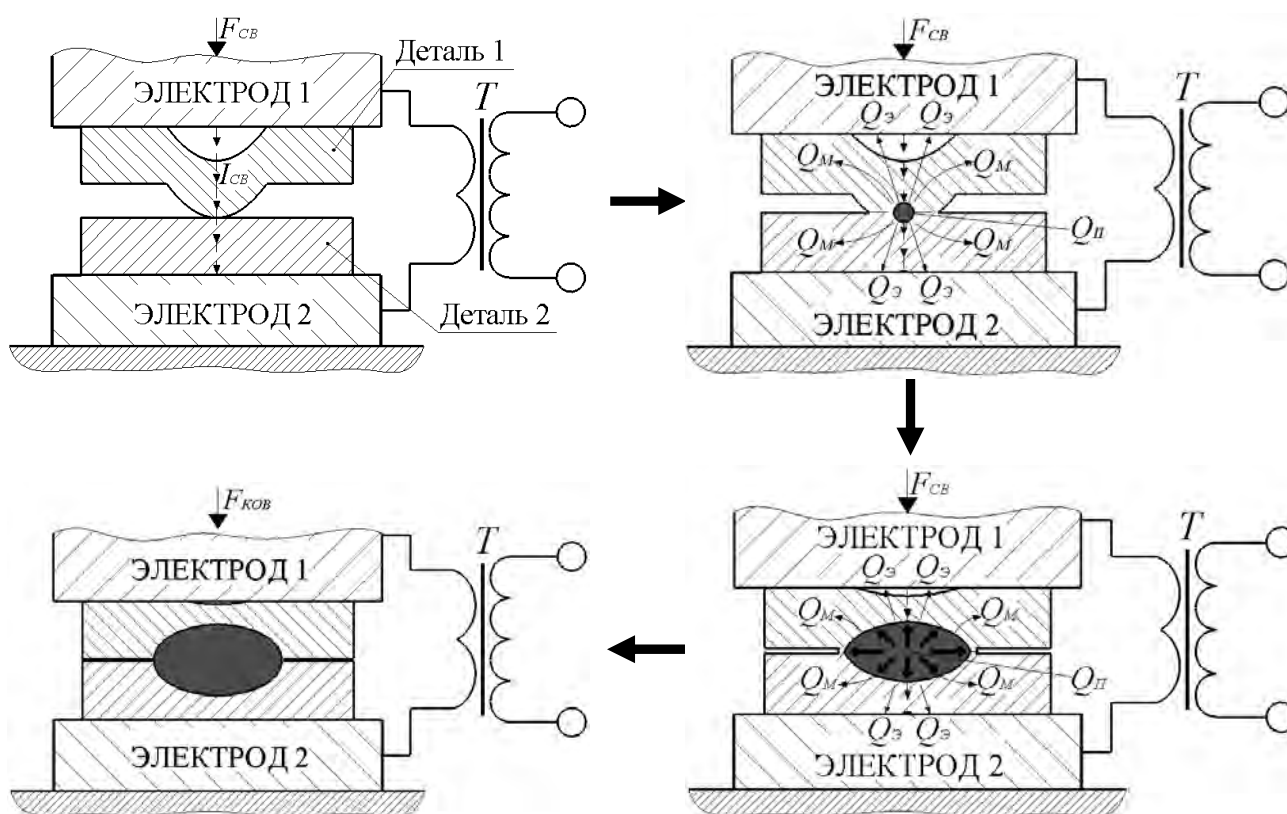
а – точечная сварка; б – рельефная сварка; в – сварная точка (F_{CB} – усилие сжатия электродов; T – сварочный трансформатор)

Рисунок 1.1 – Схемы процессов контактной сварки и их конечный результат

С целью возможности получения за один цикл нескольких десятков точек оборудование для КРС вместо классических точечных электродов оснащается массивными электродными плитами с пазами под установку электродных узлов, что повышает производительность процесса.

Для формирования рельефного сварного соединения необходимо, чтобы под действием процессов сжатия и нагрева со стороны электродов достаточно жесткий рельеф одной детали внедрился в тело другой детали, интенсивно деформируясь и частично расплавляясь [3].

Наличие рельефов является важным преимуществом рельефной сварки перед точечной. Линии протекания тока концентрируются у вершин рельефов в контактах деталь–деталь малой площади, которые к моменту выключения тока определяются диаметрами самих рельефов [4] (рисунок 1.2). Это позволяет осуществлять концентрированный полезный нагрев металла деталей благодаря высокой плотности тока, достигающей 400 А/мм^2 [5].



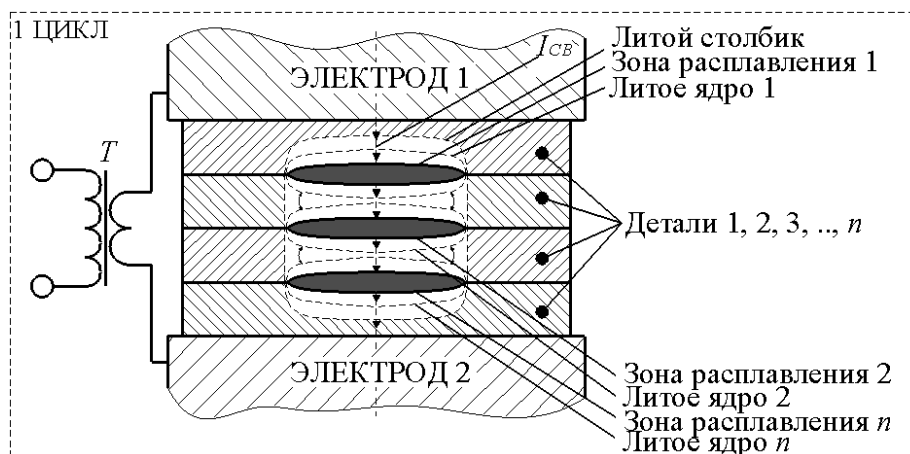
- – условный объем перегретого металла в зоне максимальной плотности тока;
- – область взаимного расплавления, растущая до закрытия зазора между деталями;
- – литое ядро (сварная точка) после кристаллизации под действием усилияковки

$Q_{\text{л}}$, $Q_{\text{м}}$, $Q_{\text{э}}$ – полезная энергия нагрева, энергия теплоотвода в основной металл деталей и в электроды соответственно; $I_{\text{св}}$ – сварочный ток

Рисунок 1.2 – Схема процесса КРС нахлесточного соединения, состоящего из двух плоских деталей

Рельефной сваркой также можно эффективно соединять три и более деталей за один цикл при последовательном (рисунок 1.3, а) или параллельном (рисунок 1.3, б) протекании через них сварочного тока, т. е. получать пакетные (многослойные, ступенчатые) соединения [1, 4, 6–8].

а)



б)

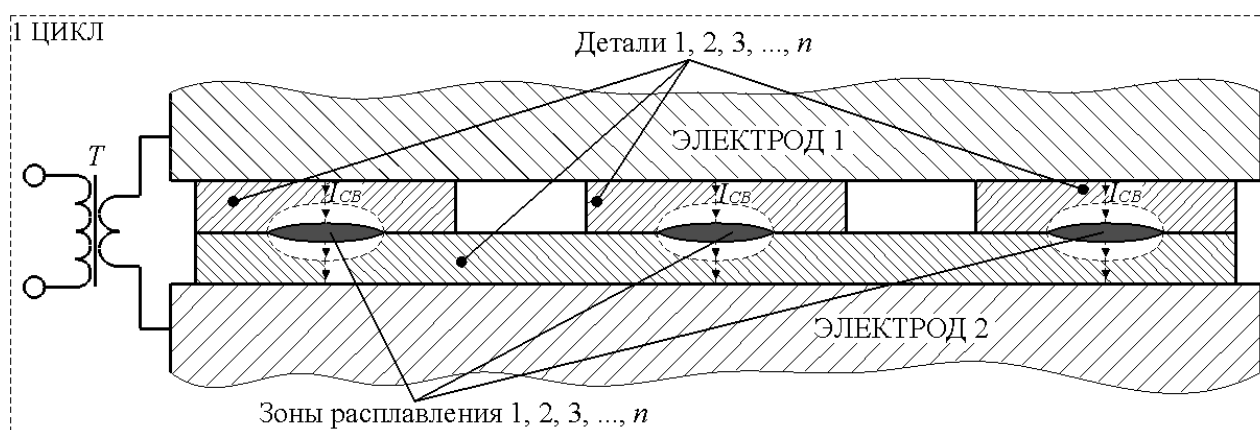


Рисунок 1.3 – Схема процесса КРС пакетного соединения при последовательном (а) и параллельном (б) протекании тока через детали соответственно

КРС широко применяется не только при получении нахлесточных соединений, состоящих из плоских деталей [9], но и в тех случаях, когда необходимо сварить между собой:

- прутки, стержни или трубки вкрест (рисунок 1.4, а, б) [10–12];
- прутки с пластинами внахлестку (рисунок 1.4, в) [13];
- бобышки с пластинами «Т-образно» (рисунок 1.4, г) [14];
- специальные болты с пластинами «Т-образно» (рисунок 1.4, д) [15];
- стержни или бобышки с пластинами «острой гранью» (рисунок 1.4, е) [16, 17];
- пластины между собой через промежуточные вставки (рисунок 1.4, жс) [1].

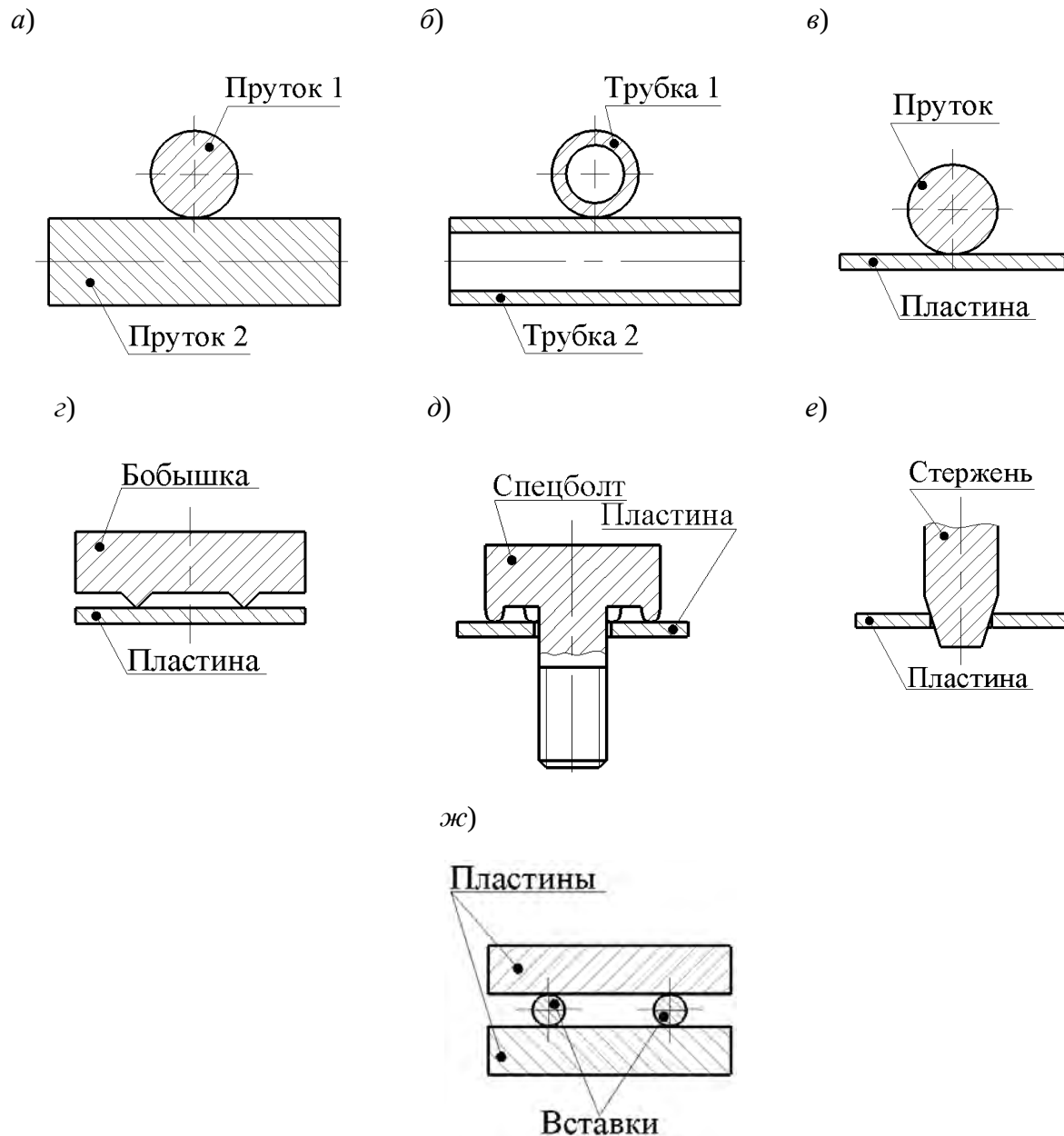


Рисунок 1.4 – Схемы взаимного расположения деталей перед КРС различных соединений (кроме нахлесточных соединений пластин)

В литературе по контактной сварке встречаются процессы, по своей сущности близкие к КРС: сварка с раздавливанием кромок деталей, расположенных с нахлесткой (рисунок 1.5, а) [18, 19], сварка встык стержня и пластины (рисунок 1.5, б) [20], сварка бобышки с пластиной «Т-образно» по слою флюса (рисунок 1.5, в) [21].

В свою очередь, форма и размеры рельефа существенно влияют на процесс КРС в целом, т. к. именно эти параметры в каждом конкретном случае (с соответствующей плотностью тока) придают уникальность электротермодеформационной способности металла в контакте деталь–деталь. При сварке нахлесточных соединений наиболее часто применяются рельефы круглой или

продолговатой вытянутой формы, а при необходимости обеспечения герметичности соединений – кольцевой формы [22].



а – сварка с раздавливанием кромок деталей, расположенных с нахлесткой; *б* – сварка встык стержня с пластиной; *в* – сварка бобышки с пластиной «Т-образно» по слою флюса

Рисунок 1.5 – Схемы взаимного расположения деталей перед контактной сваркой, близкой к КРС по своей сущности

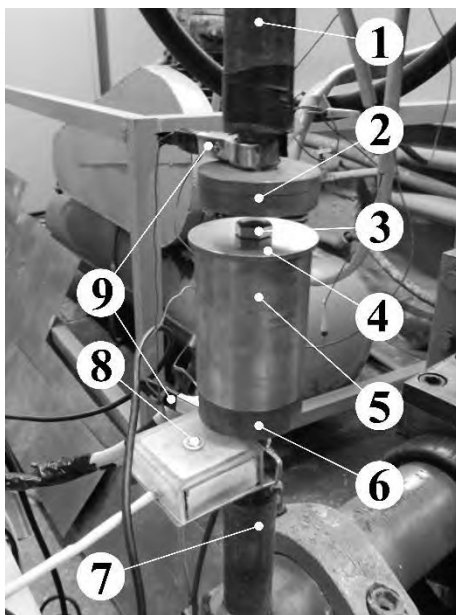
Следует отметить, что для процесса КРС характерна интенсивная радиально направленная пластическая деформация металла в зоне контакта деталь–деталь, в 10...15 раз большая, чем при КТС [1]. Поэтому если сравнить процессы КТС и КРС в условиях схожих колебаний величины и длительности протекания импульса сварочного тока, а также усилия сжатия электродов относительно оптимальных значений, то рельефные сварные соединения в подавляющем большинстве случаев обладают более высокой прочностью по отношению к точечным [23].

Типичные материалы, свариваемые КРС, – стали и титановые сплавы. В отдельных случаях применение рельефов увеличенного диаметра с повышением сварочного тока и усилия сжатия электродов дает возможность сваривать стали с цинковыми или кадмиевыми покрытиями [22]. Жесткие режимы сварки в комбинации с относительно большими значениями сварочного тока позволяют сваривать легкие сплавы [24]. Известны успешные попытки получения биметаллических соединений способом КРС («быстрорежущая сталь + конструкционная сталь», «титан + низкоуглеродистая сталь» и др.) [25–28].

Толщина свариваемого металла при КРС напрямую зависит от технических характеристик и возможностей применяемого сварочного оборудования. Машины контактной точечной сварки при оснащении комплектами электродов с увеличенной площадью контакта успешно используются предприятиями для рельефной сварки деталей небольших толщин (рисунок 1.6).

При этом срок службы у электродов с увеличенной площадью контакта на порядок выше, чем у точечных. По этой причине их часто применяют в тяжелых условиях эксплуатации (с частыми перегревами контактной поверхности),

например, при многоцикловой КРС арматуры. Установлено, что при КРС арматуры по стойкости к износу материалы электродов можно расположить в ряд в порядке убывания: БрХКд 0,5-0,3; МЦ5Б; МЦ4; БрХ; М1 [29].



1 – верхний электрододержатель; 2 – верхний электрод для КРС; 3 – деталь 1 (болт с кольцевым рельефом); 4 – деталь 2 (пластина с отверстием по центру); 5 – промежуточная втулка для фиксации деталей; 6 – нижний электрод для КРС; 7 – нижний электрододержатель; 8 – датчик тока на эффекте Холла; 9 – зажимы датчика напряжения

Рисунок 1.6 – Сварка кронштейна лифта способом КРС на машине точечной сварки МТ-3201

Специализированные рельефные прессы позволяют успешно и высокопроизводительно сваривать детали увеличенных толщин токами до 100 кА и более, однако их высокая мощность ограничивает продолжительность включения тока и увеличивает паузы между циклами во избежание перегрузок сварочного трансформатора [30]. В таких условиях предъявляются повышенные требования к системе охлаждения силовых тиристорных системы управления, вторичной обмотки сварочного трансформатора, а также токоведущих элементов вторичного контура контактной машины.

В сравнении с дуговой сваркой КРС является не только высокопроизводительным способом соединения тонко- и среднетолщинного листового металла, но и безопасным процессом с высокой культурой производства. В процессе КРС отсутствуют выбросы токсичных газов, ультрафиолетовое излучение и повышенный уровень шума.

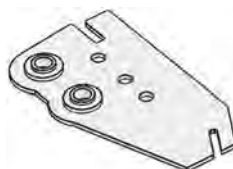
Однако вследствие влияния на процесс сварки возмущающих воздействий, например, колебания сетевого напряжения, инерционности привода сжатия электродов или наличия ржавчины на деталях, возможны выплески

расплавленного металла из межэлектродной зоны в виде искр. Также может иметь место воздействие электромагнитного поля со стороны вторичного контура контактной машины на механизмы, оказавшиеся в непосредственной близости к нему. Например, величины сварочного тока в 20 кА при КРС или КТС достаточно для совершения нескольких самопроизвольных оборотов стрелками кварцевых часов фирмы CASIO, расположенных на расстоянии 10...20 см от электродов.

В промышленности способом КРС изготавливают узлы лифтов (кронштейны, петли и др.) [31], сельскохозяйственной техники (фиксаторы, держатели, проушины и др.) [32], легковых и грузовых автомобилей (тормозные колодки и др.) [33], арматурные узлы (плоские, прямоугольные и цилиндрические объемные каркасы, закладные детали, сетки и др.) [34, 35], а также элементы товаров широкого народного потребления (засовы дверных замков, рамки печных дверей, колодки рубанков, лопаты, корпуса фонарей и др.) [36] (рисунок 1.7).



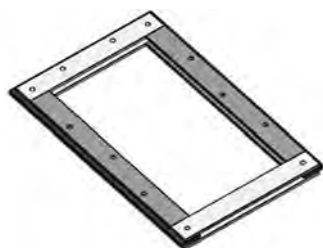
Узлы пассажирского лифта



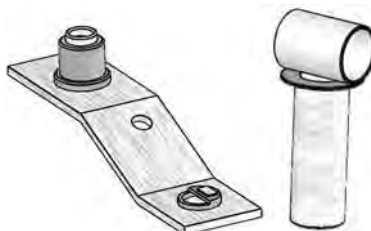
Кронштейн трактора



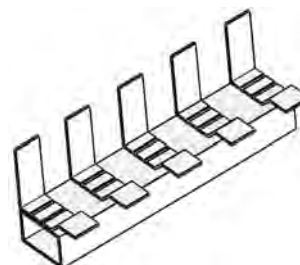
Засов дверного замка



Рамка печной двери



Узлы мотоцикла



Балка фермы



Колодка рубанка



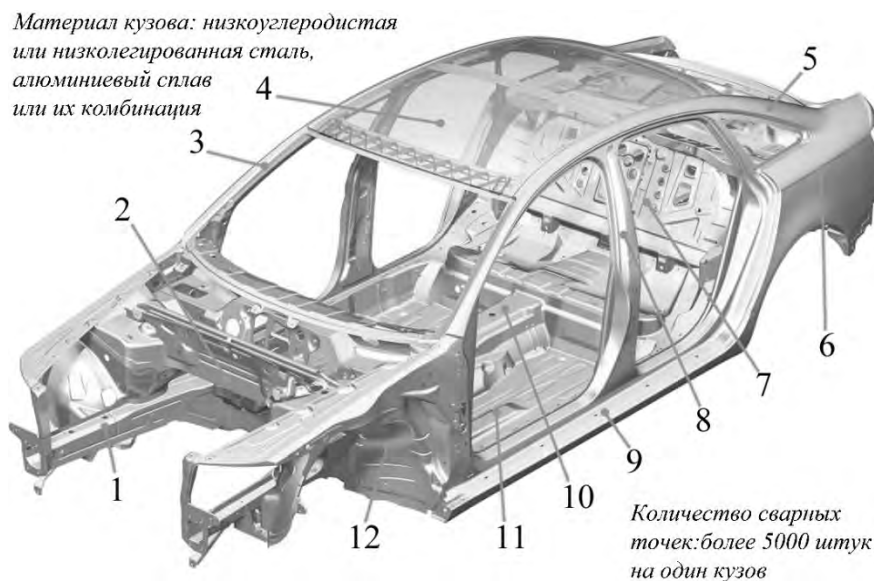
Тормозная колодка автомобиля



Корпус фильтра

Рисунок 1.7 – Типовые узлы, свариваемые КРС

Сегодня одной из наиболее перспективных областей применения КРС (наряду с КТС) является сварка элементов кузовов легковых автомобилей (лонжероны, крылья, стойки, пороги и др.) (рисунок 1.8).



1 – передний лонжерон; 2 – передний щит; 3 – передняя стойка; 4 – крыша; 5 – задняя стойка; 6 – заднее крыло; 7 – панель багажника; 8 – средняя стойка; 9 – порог; 10 – центральный тоннель; 11 – основание; 12 – брызговик

Рисунок 1.8 – Контактно-сварной несущий кузов легкового автомобиля

Количество сварных точек, приходящихся на один кузов, составляет более 5000 шт. (например, 11355 и 7878 шт. для ранее производимых кузовов автомобилей ВАЗ-2101 и ГАЗ-66 соответственно) [37].

В Республике Беларусь сейчас существует ряд предприятий по сборке легковых автомобилей: СЗАО «БелДжи» (марка Geely), Белорусско-Британское совместное предприятие ЗАО «ЮНИСОН» (марки автомобилей Zotye, Peugeot, Citroën, Opel, Chevrolet, Samand, спецтехника на базе Mercedes-Benz).

При этом в соответствии с Указом № 479 Президента Республики Беларусь [38] первоначально лишь к 2030 г. перед страной ставилась задача запуска полноценного производства белорусских легковых автомобилей (в том числе и их кузовов с общей долей в себестоимости автомобиля не менее 18...20 %) вместо «отверточной» сборки импортных комплектующих. Однако уже 17 ноября 2017 г. при поддержке китайских партнеров с конвейера СЗАО «БелДжи» был выпущен первый автомобиль марки Geely Atlas NL3 (рисунок 1.9).

В свою очередь, для КРС элементов кузовов не требуется применения специализированного оборудования, т. к. робототехнические комплексы КТС при наличии соответствующих комплектов электродов успешно выполняют данную задачу. Следует отметить, что в таких случаях для КРС часто используются и обычные точечные электроды (название процесса «точечно-рельефная сварка») [39]. Толщина свариваемого металла элементов кузова редко превышает 3 мм, поэтому штамповка рельефов незатруднительна [40, 41].



Рисунок 1.9 – Первый легковой автомобиль, произведенный в Республике Беларусь

Помимо этого, на многих предприятиях республики все чаще прослеживается общая тенденция замены трудоемких способов дуговой сварки на контактную рельефную при изготовлении крупных партий малогабаритных узлов, что связано с мероприятиями по ресурсо- и энергосбережению на производстве.

1.2 Процессы, происходящие при КРС

Формирование рельефного сварного соединения представляет собой сложный электротермодеформационный процесс, обусловленный:

- формой и размерами рельефа (например, при сварке нахлесточных соединений по круглому выштампованному рельефу концентрация линий протекания тока увеличивается от его центра к периферии);
- характером нагрева материалов свариваемых деталей и электродов (вид, форма и длительность протекания импульса тока, количество импульсов, количество и длительность пауз между импульсами, жесткость режима сварки);
- теплофизическими свойствами материалов свариваемых деталей и электродов (удельная теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность, температура плавления, плотность и др.);
- нелинейностью зависимостей теплофизических свойств материалов свариваемых деталей и электродов от температуры (например, удельная теплоемкость низкоуглеродистой стали возрастает примерно в 3 раза при ее нагреве от 0 до 730 °С, при дальнейшем нагреве до 1000 °С снижается в 1,8 раза из-за потери сталью магнитных свойств [3], а при нагреве от 1000 до 1480 °С линейно увеличивается на 7...10 %) [42];
- свариваемостью материала деталей (например, установлено, что увеличение содержания углерода и легирующих элементов в стали ухудшает ее свариваемость контактной сваркой без расплавления);

– зависимостью величины холодных контактных сопротивлений от состояния обработки поверхностей свариваемых деталей и электродов (отполированные поверхности стальных пластин могут обладать сопротивлением, в сотни тысяч раз меньшим в сравнении со ржавыми);

– характером изменения сопротивления межэлектродной зоны при сварке в зависимости от динамики роста площадей контактов деталь–деталь и электрод–деталь, определяемой конкретными циклограммами нагрева и сжатия деталей;

– тепловым расширением материала деталей при нагреве (дилатометрический эффект) (в меньшей степени в сравнении с КТС);

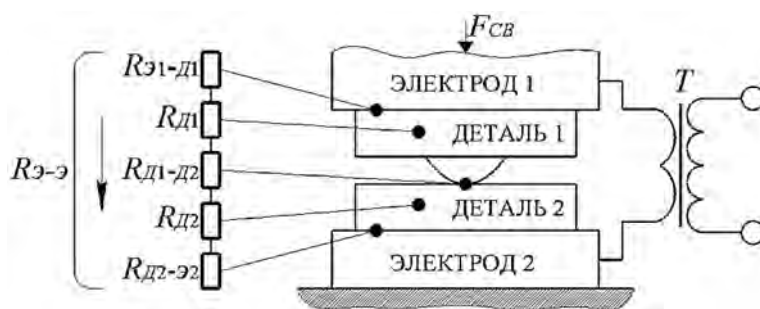
– выделением или поглощением теплоты при фазовых превращениях (например, для стали, содержащей 0,44 % углерода и 0,71 % марганца, теплота превращения бейнита равна $20,9 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$, мартенсита – $75,3 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$ [43]);

– действием возмущений на процесс сварки (инерционность привода сжатия и податливость нижней части вторичного контура контактной машины, колебания сетевого напряжения, несовершенства формы выштампованных рельефов и др.).

Основным процессом, обуславливающим формирование рельефного сварного соединения, является высокотемпературный нагрев от пропускания импульсов тока через детали.

Если рассматривать рельефную сварку как разновидность точечной, то источником выделения теплоты в металле при КРС является электрическое сопротивление межэлектродной зоны $R_{\Sigma\text{э}}$, включающее в себя:

- сопротивление деталей, распределенное по их собственному объему (т. к. детали являются твердыми телами);
- сопротивление контактов деталь–деталь;
- сопротивление контактов электрод–деталь (рисунок 1.10).



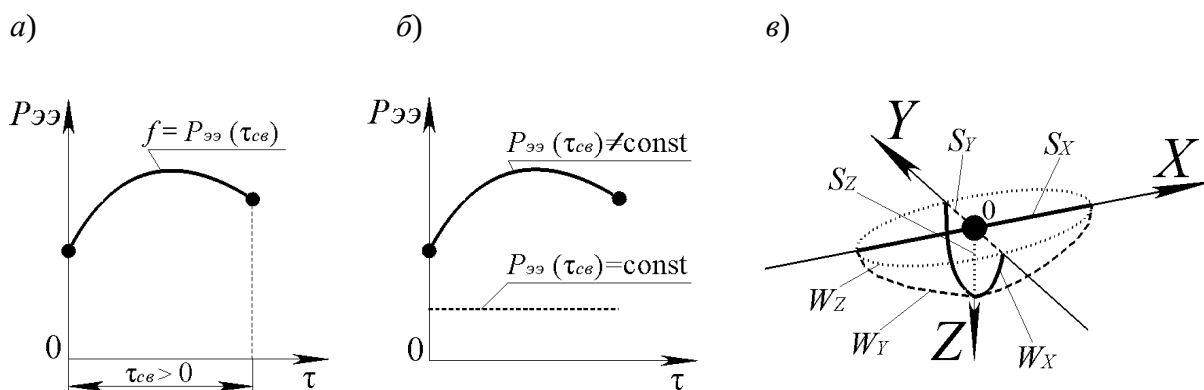
$R_{\text{э1-д1}}$ – сопротивление контакта электрод 1–деталь 1; $R_{\text{д1}}$ – собственное сопротивление детали 1; $R_{\text{д1-д2}}$ – сопротивление контакта деталь 1–деталь 2; $R_{\text{д2}}$ – собственное сопротивление детали 2; $R_{\text{д2-э2}}$ – сопротивление контакта деталь 2–электрод 2

Рисунок 1.10 – Схема электрического сопротивления межэлектродной зоны $R_{\Sigma\text{э}}$ при КРС

При КРС выделяемая в зоне сварки теплота может привести к образованию соединений с расплавлением металла (при достижении температуры плавления металла и выше) или без расплавления, т. е. в твердой фазе (температура плавления металла не достигается) [3].

Источник выделения теплоты при КРС характеризуется следующими признаками (по аналогии с КТС) [44]:

- является идеализированным источником с физико-математической точки зрения;
- является непрерывно действующим источником по длительности выделения теплоты, которая больше нуля (при КРС большинства соединений длительность импульса тока составляет 0,1...1,5 с) (рисунок 1.11, а);
- является источником переменной мощности, а не постоянной (например, при сварке плавлением принятие источника постоянной мощности упрощает тепловые расчеты) (рисунок 1.11, б);
- является объемным источником по мерности распределенности в пространстве (рисунок 1.11, в);
- является неподвижным источником по скорости движения (скорость его движения равна нулю в момент пропускания импульсов тока).

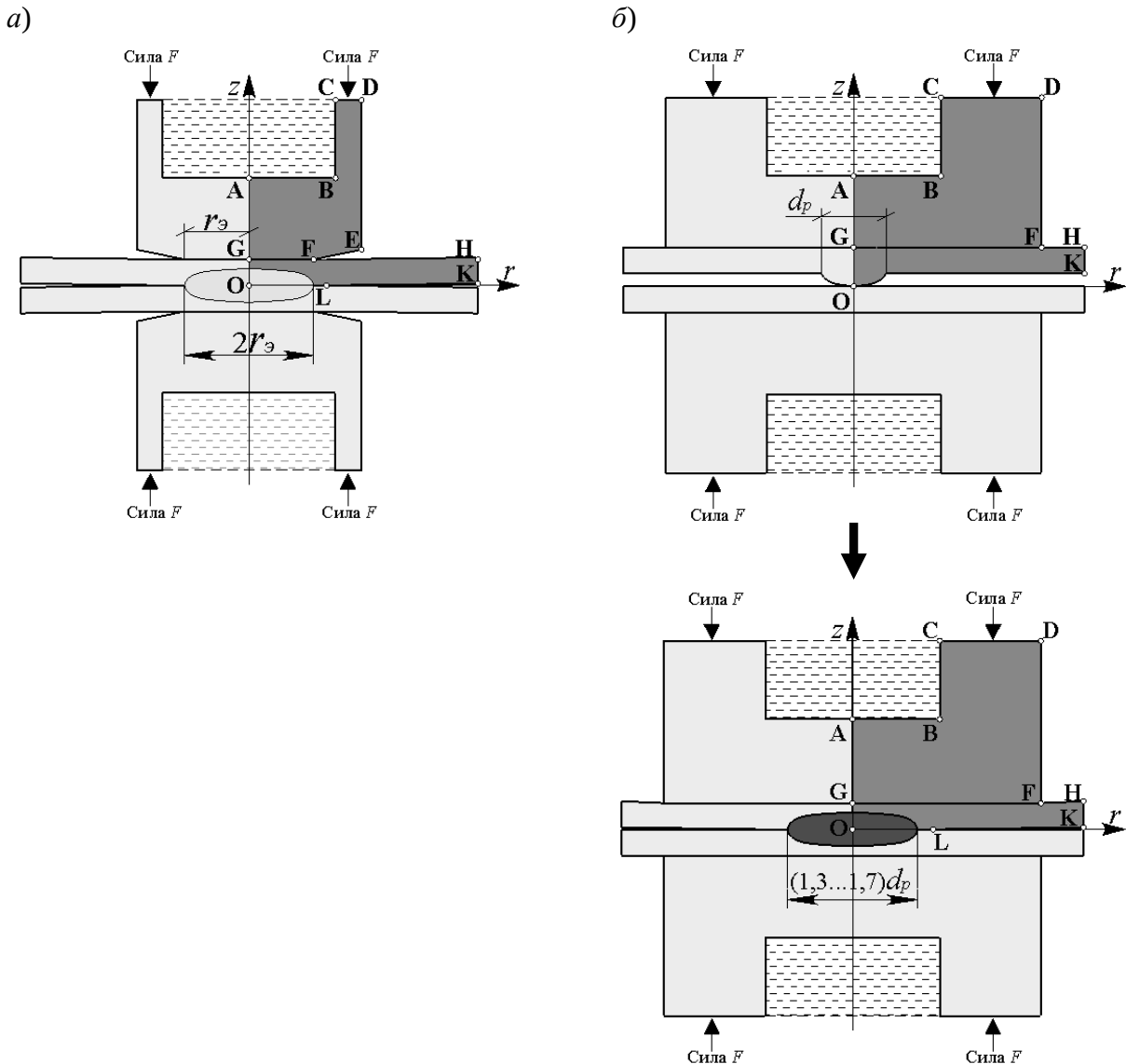


а – непрерывно действующий источник; б – источник переменной мощности; в – объемный источник ($P_{ээ}$ – мощность межэлектродной зоны; τ – время; $\tau_{св}$ – длительность протекания импульса тока; $f = P_{ээ}(\tau_{св})$ – функция изменения мощности межэлектродной зоны при сварке; OX, OY, OZ – координатные оси; S_X, S_Y, S_Z – направления перемещения вдоль координатных осей; W_X, W_Y, W_Z – направления вращения вокруг координатных осей)

Рисунок 1.11 – Признаки источника выделения теплоты при КРС

При КРС на процесс выделения теплоты в межэлектродной зоне важнейшее влияние оказывает изменение площадей контактов деталь–деталь и электрод–деталь. В этом компоненте процесс КРС принципиально отличается от точечной сварки. Например, в случае КТС нахлесточных соединений плоских деталей при формулировке задачи теплопроводности обязательным допущением является то, что контактная поверхность деталей является плоскостью

симметрии (электроды и детали попарно одинаковы). На рисунке 1.12, а (схема КТС) тело симметрично относительно осей r и z , поэтому при формулировке начальных и граничных условий можно рассматривать только границу OABCD E F H K L O [44]. На рисунке 1.12, б (схема КРС) электроды попарно одинаковы, а детали неодинаковы, т. к. на верхней из них имеется круглый рельеф.



$r_{\text{э}}$ – радиус точечного электрода; d_p – диаметр рельефа

Рисунок 1.12 – Сравнение схем КТС (а) и КРС (б) по форме контактов электрод–деталь и деталь–деталь

При этом рельеф в процессе КРС интенсивно сминается, постоянно изменяя площадь контакта деталь–деталь. Это приводит к тому, что при решении тепловой задачи процесса КРС перед включением сварочного тока формулировка начальных и граничных условий определяется границей OABCD E F H K L O,

а при протекании тока с момента включения и до выключения — границей OABCD $\overline{F}$ HKLO.

Таким образом, в отличие от точечной сварки, при КРС температурное поле в теле с объемным источником теплоты является осесимметричным только относительно оси z (см. рисунок 1.12, б).

Электрическое поле при КРС также характеризуется неравномерностью. Оно симметрично относительно оси z и асимметрично относительно оси r (из-за геометрии рельефа). Причем в сравнении с точечной сваркой при КРС значительное сгущение силовых линий и повышенная плотность тока наблюдаются только вблизи контакта деталь–деталь, т. к. площади контактов электрод–деталь значительно больше и, соответственно, плотность тока в них существенно ниже (рисунок 1.13).

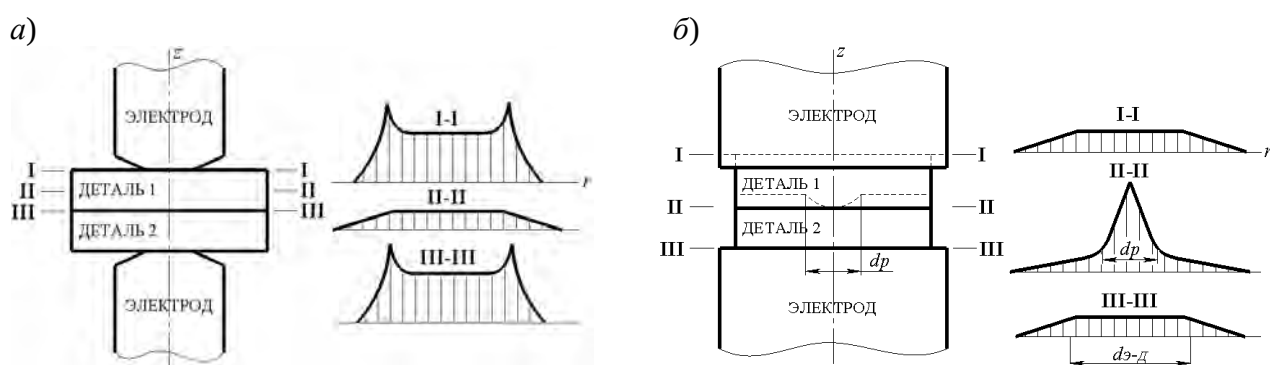


Рисунок 1.13 – Распространение плотности тока относительно оси z при КТС (а) и КРС (б)

Следует отметить, что по своей сути вышеописанный высоко-температурный нагрев межэлектродной зоны КРС протекающим током происходит благодаря преобразованию вводимой электрической энергии в тепловую, что в конечном счете приводит к упругопластическому деформированию рельефа и его внедрению в тело другой детали. Однако это становится возможным благодаря силовому воздействию на них со стороны электродов.

Воздействие на детали усилия сжатия придает динамичность процессам кинетики формирования рельефного сварного соединения. С момента включения и до момента выключения тока площадь контакта деталь–деталь увеличивается от минимальной до максимальной с соответствующим уменьшением сопротивления контакта. При этом нарастающий характер импульса сварочного тока и скачок сопротивления в момент образования общего расплавленного ядра обуславливают незначительное уменьшение теплогенерации в контакте деталь–деталь в последующих периодах сетевого напряжения вплоть до момента выключения тока [45].

Важным вспомогательным процессом КРС, обуславливающим отсутствие шунтирования тока через детали в конце процесса нагрева после полного деформирования рельефа и приближения величины междетального зазора к нулю, является тепловое расширение металла [4]. Высокотемпературный нагрев свариваемых деталей сопровождается их местным утолщением в осевом направлении в области начального прохождения тока под воздействием силы термического расширения (дилатометрический эффект). Усилие сжатия электродов, развиваемое приводом контактной машины, относительно невелико в сравнении с этой силой, что позволяет поддерживать между деталями некоторый зазор вне площади контакта деталь–деталь, не допускающий случайных касаний и появления путей шунтирования тока.

При КРС в результате нагрева металла межэлектродной зоны сварочным током и воздействия на нее усилия сжатия со стороны электродов, наряду с выделением теплоты по закону Джоуля-Ленца, а также объемным расширением/сужением металла свариваемых деталей, происходят следующие сопутствующие процессы: изменение теплофизических свойств металла вследствие повышения температуры (удельное электросопротивление, удельная теплоемкость и др.); структурные изменения металла зоны термического влияния; пластическая деформация металла; взаимодействие разнородных металлов в контакте электрод–деталь; выделение/поглощение теплоты Пельтье при сварке униполярными импульсами тока; поверхностный эффект.

Таким образом, совокупность основных и сопутствующих процессов, протекающих одновременно в межэлектродной зоне при КРС, обуславливает высокую сложность анализа этого способа сварки давлением. В теоретическом аспекте только применение специализированных программ, основанных на методе конечных элементов, позволяет адекватно изучать и совершенствовать процесс КРС.

1.3 Методики определения основных параметров режима КРС

При КРС основными параметрами режима являются:

- величина импульса сварочного тока I_{CB} ;
- длительность импульса сварочного тока τ_{CB} ;
- усилие сжатия электродов F_{CB} ;
- количество импульсов сварочного тока;
- длительность предварительного сжатия электродов $\tau_{CЖ}$;
- длительность выдержки деталей в сжатом состоянии после выключения тока $\tau_{ПР}$ (проковка).

Дополнительные параметры режима КРС:

- величина импульса тока подогрева $I_{ПОД}$;
- длительность импульса тока подогрева $\tau_{ПОД}$;



- величина импульса тока термообработки $I_{ТО}$;
- длительность импульса тока термообработки $\tau_{ТО}$;
- длительность τ_i пауз между импульсами $I_{СВ}$, $I_{ПОД}$, $I_{ТО}$;
- количество импульсов $I_{СВ}$, $I_{ПОД}$ и $I_{ТО}$;
- длительность паузы до следующего цикла сварки $\tau_{П}$;
- повышенное ковочное усилие $F_{КОВ}$;
- длительность приложения повышенного ковочного усилия $\tau_{КОВ}$;
- длительность запаздывания повышенного ковочного усилия $\tau_{ЗАП}$;
- форма и площадь контактной поверхности электродов.

Циклограммы процесса КРС обычно выбирают те же, что и для точечной сварки (в зависимости от условий сварки):

- с постоянным приложением $F_{СВ}$ до, во время и после протекания импульса $I_{СВ}$;
- с приложением $F_{КОВ}$ в момент выключения импульса $I_{СВ}$;
- с приложением $F_{КОВ}$ перед моментом включения импульса $I_{СВ}$;
- с приложением $F_{КОВ}$ до включения импульса $I_{СВ}$, а также после его выключения;
- без использования импульсов $I_{ПОД}$ и $I_{ТО}$;
- с использованием импульсов $I_{ПОД}$ и $I_{ТО}$;
- с использованием нескольких импульсов $I_{СВ}$ и $I_{ПОД}$.

Анализ имеющейся литературы по контактной сварке позволяет выделить три метода определения основных параметров режима КРС.

Первый и самый главный метод заключается в расчете уравнения теплового баланса (далее – УТБ) межэлектродной зоны. В соответствии с УТБ для обеспечения процесса нагрева металла свариваемых деталей необходимо, чтобы в межэлектродную зону была введена определенная электрическая энергия $Q_{ЭЭ}$, которая затем преобразуется в тепловую. При сварке данная энергия расходуется, во-первых, на так называемый «полезный нагрев» металла свариваемых деталей, во-вторых, на теплоотвод в основной металл свариваемых деталей и, в-третьих, на теплоотвод в электроды сварочной машины (см. обозначения $Q_{П}$, $Q_{М}$ и $Q_{Э}$ на рисунке 1.2). Для расчета величины $Q_{ЭЭ}$ и ее составляющих вычерчиваются геометрия соединения и схема процесса сварки (рисунок 1.14).

На рисунке 1.14: d_P и h_P – диаметр и высота рельефа соответственно; δ_1 и δ_2 – толщины свариваемых деталей; $h_{СТ}$ – высота условного столбика металла свариваемых деталей, нагреваемого до температуры, близкой к температуре его плавления; X_M – ширина условного кольца металла свариваемых деталей, окружающего столбик и нагреваемого до температуры около $0,25T_{ПЛ}$ при теплоотводе; $Y_{Э}$ – высота условного столбика металла электрода, нагреваемого до температуры около $0,125T_{ПЛ}$ при теплоотводе; $T_{ПЛ}$ – температура



плавления металла свариваемых деталей; затемненная область – зона расплавления.

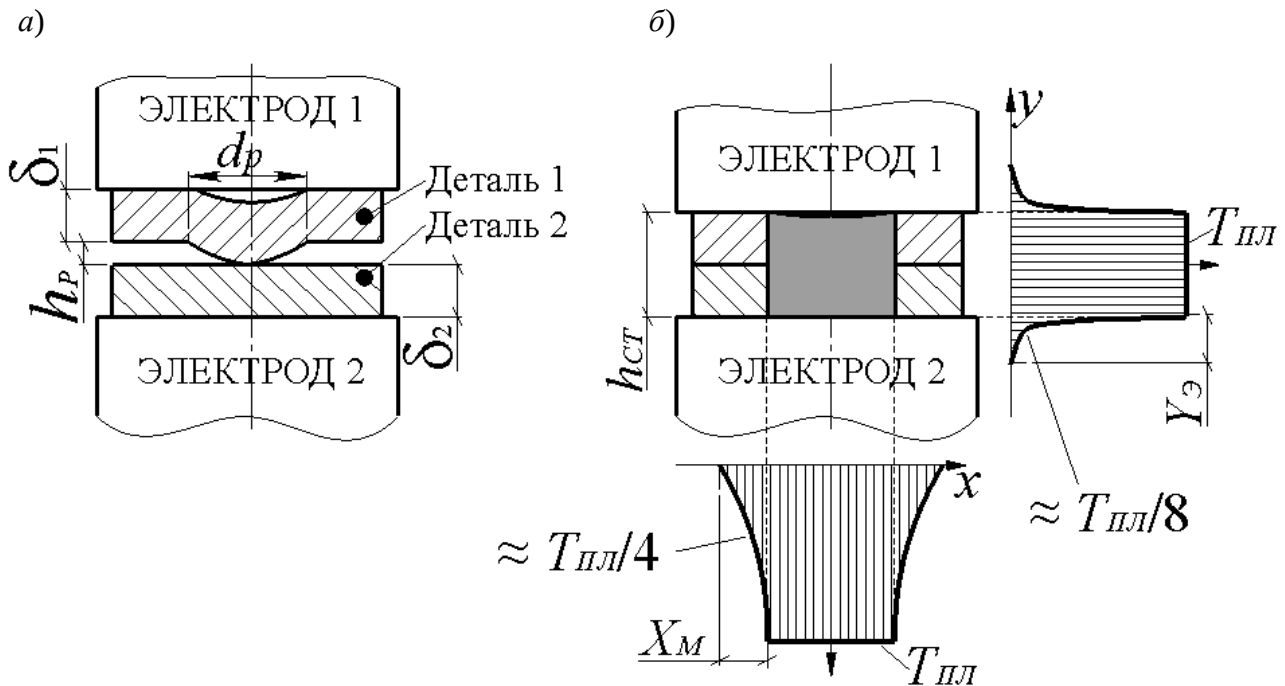


Рисунок 1.14 – Геометрия рельефного соединения перед сваркой (а) и расчетная схема уравнения теплового баланса (б)

Далее составляется УТБ и приводятся формулы расчета его составляющих:

$$Q_{ээ} = Q_{пл} + Q_M + Q_{э} + Q_K; \quad (1.1)$$

$$Q_{пл} = V_M c_M \gamma_M T_{пл}; \quad (1.2)$$

$$Q_M = V_K K_1 c_M \gamma_M (0,25T_{пл}); \quad (1.3)$$

$$Q_{э} = 2V_{э} K_2 c_{э} \gamma_{э} (0,125T_{пл}), \quad (1.4)$$

где V_M – объем условного столбика металла свариваемых деталей, нагреваемого до температуры, близкой к температуре его плавления;

V_K – объем условного кольца металла свариваемых деталей, окружающего указанный столбик и нагреваемого до температуры около $0,25T_{пл}$ при теплоотводе;

$2V_{э}$ – суммарный объем условных столбиков металла двух одинаковых электродов, нагреваемых до температуры около $0,125T_{пл}$ при теплоотводе;

K_1 – коэффициент учета неравномерности нагрева кольца металла свариваемых деталей по объему, $K_1 = 0,8$;

K_2 – коэффициент учета формы контактной поверхности электродов (для цилиндрических электродов $K_2 = 1$, для конических $K_2 = 1,5$, для сферических $K_2 = 2$);

c_M и $c_Э$ – удельная теплоемкость металла свариваемых деталей и электродов соответственно;

γ_M и $\gamma_Э$ – плотность металла свариваемых деталей и электродов соответственно;

Q_K – энергия, затрачиваемая на конвективный теплообмен металла с окружающей средой (обычно его пренебрегают ввиду малой величины).

При определении объема условного столбика металла свариваемых деталей V_M , в рамках которого должно образоваться неразъемное соединение в виде общего литого ядра, важно учитывать, что только при сварке тонколистового металла (толщиной до 5 мм) температура по всей высоте столбика может приближаться к температуре плавления. При больших толщинах свариваемых листов высота условного столбика металла $h_{СТ}$, нагреваемого до таких температур, снижается ($h_{СТ} \neq \delta_1 + \delta_2$), и ее расчет представляет собой трудную задачу (рисунок 1.15). В таких случаях необходимо моделировать процесс сварки с помощью программного обеспечения на базе конечно-элементных методов расчета электротермодеформационных процессов в межэлектродной зоне.

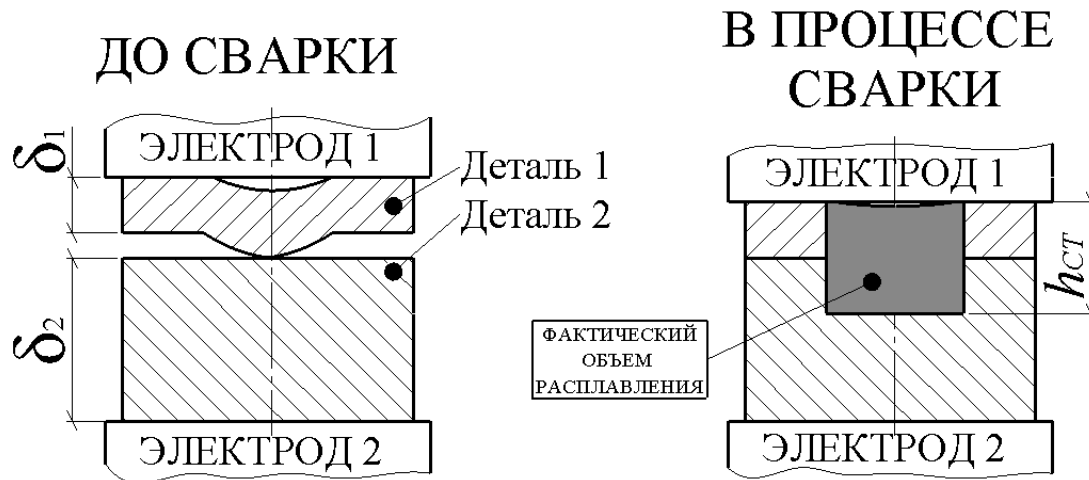


Рисунок 1.15 – Фактический объем расплавления металла при КРС больших толщин

Для наиболее применяемого на производстве при КРС листового металла толщиной до 5 мм при сварке двух деталей по круглому рельефу:

– объем условного столбика металла V_M в горизонтальной плоскости его сечения ограничивается площадью $S_{СТ}$, определяемой диаметром рельефа d_P , а высота столбика $h_{СТ}$ – суммарной толщиной свариваемых деталей ($\delta_1 + \delta_2$) (рисунок 1.16):

$$V_M = S_{CT} h_{CT} = 0,25\pi d_P^2 (\delta_1 + \delta_2); \quad (1.5)$$

– объем условного кольца металла V_K в горизонтальной плоскости сечения ограничивается кольцевой площадью S_K с внутренним диаметром, равным диаметру рельефа d_P , и внешним диаметром, определяемым шириной данного кольца X_M ; при этом высота кольца ограничивается суммарной толщиной свариваемых деталей (рисунок 1.17):

$$V_K = S_K h_K = 0,25\pi((d_P + 2X_M)^2 - d_P^2)(\delta_1 + \delta_2); \quad (1.6)$$

$$V_K = \pi X_M (d_P + X_M)(\delta_1 + \delta_2); \quad (1.7)$$

– объем условного столбика металла одного электрода V_{Σ} в горизонтальной плоскости сечения ограничивается не площадью контакта электрод–деталь, как при КТС, а площадью круга S_{KP} (для высаженных рельефов) или кольца $S_{КОЛ}$ (для выштампованных рельефов) с внешним диаметром, несколько превышающим диаметр рельефа d_P (после сварки цвета побежалости на металле в зоне контакта электрод–деталь свидетельствуют о том, что это превышение составляет $\Delta = 4...6$ мм); при этом высота условного столбика равна Y_{Σ} (рисунок 1.18):

$$V_{\Sigma} = S_{KP} Y_{\Sigma} \quad \text{или} \quad V_{\Sigma} = S_{КОЛ} Y_{\Sigma}; \quad (1.8)$$

$$V_{\Sigma} = 0,25\pi(d_P + \Delta)^2 Y_{\Sigma} \quad \text{или} \quad V_{\Sigma} = 0,25\pi((d_P + \Delta)^2 - d_P^2) Y_{\Sigma}. \quad (1.9)$$

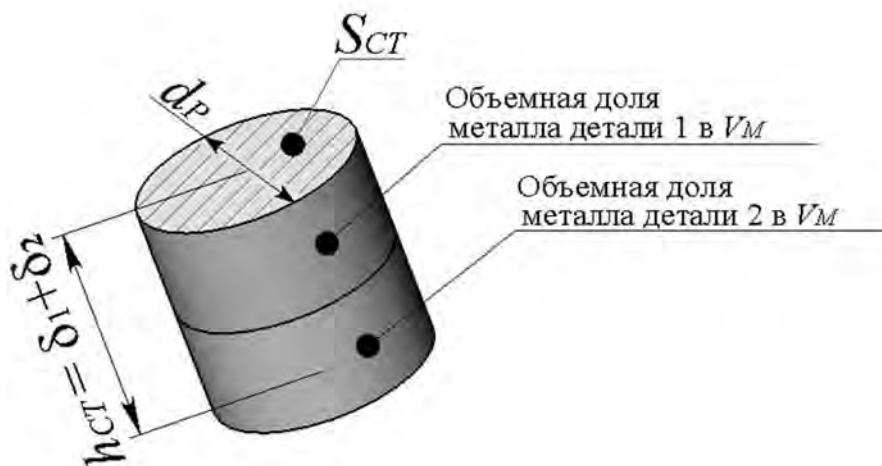


Рисунок 1.16 – Объем V_M условного столбика полезно нагреваемого металла деталей

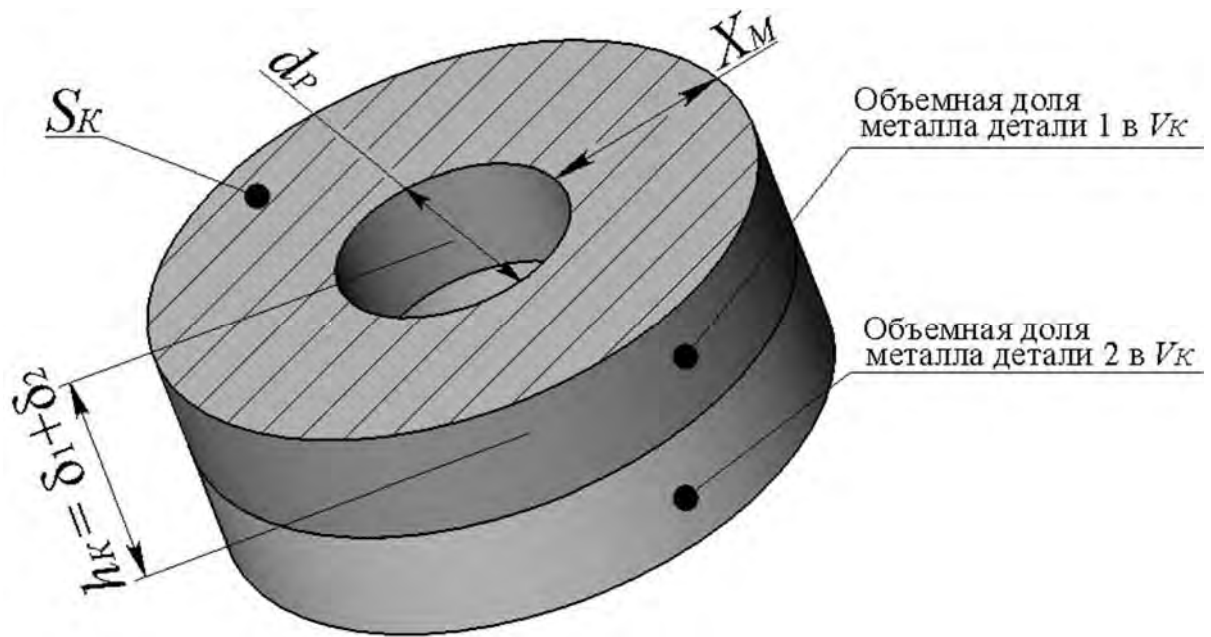


Рисунок 1.17 – Объем V_K условного кольца металла деталей, участвующего в теплоотводе

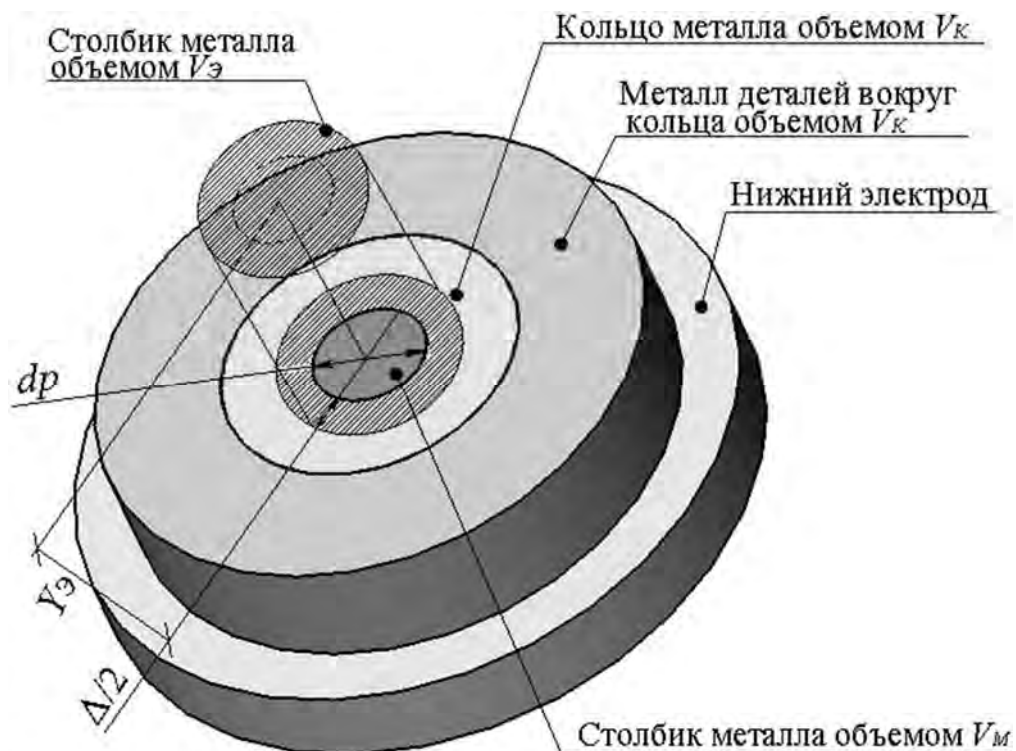


Рисунок 1.18 – Объем $V_Э$ условного столбика металла верхнего электрода, участвующего в теплоотводе (весь электрод не показан)

Параметры X_M и $Y_{\text{Э}}$ определяются по заранее известным значениям коэффициентов температуропроводности металла деталей a_M и металла электродов $a_{\text{Э}}$, а также длительности протекания сварочного тока τ_{CB} (выбираются из рекомендаций в источниках литературы для конкретных материалов и толщин):

$$X_M = 4\sqrt{a_M \tau_{\text{CB}}} ; \quad (1.10)$$

$$Y_{\text{Э}} = 4\sqrt{a_{\text{Э}} \tau_{\text{CB}}} . \quad (1.11)$$

В случаях применения нетипичных рельефов, например, вытянутой формы, напоминающей прямоугольник, необходимо учитывать изменение форм площадей сечений, ограничивающих объемы V_M , V_K и $V_{\text{Э}}$ в горизонтальной плоскости.

Таким образом, принцип расчета УТБ состоит в оценке теплосодержания конкретных объемов металла деталей и электродов, доводимых при сварке до определенных температур при полезном нагреве и теплоотводе.

Известно, что с ростом температуры истинная теплоемкость низкоуглеродистой стали сначала нелинейно нарастает приблизительно до 1,33 Дж/(г·°С) (точка Кюри), затем нелинейно падает до 0,68 Дж/(г·°С) (α - γ превращение), после чего нарастает до γ - α превращения и далее до перехода металла в жидкую фазу (0,73 Дж/(г·°С) [46, 47].

Теплосодержание стали h при этом также постоянно изменяется, например, при последовательном нагреве от 300 до 1000 К размерный ряд увеличения h через каждые 100 К имеет вид (в джоулях на грамм): 49 → 55 → 59 → 64 → 70 → 80 → 96. То есть приблизительное количество тепловой энергии, которую теоретически можно ввести в 1 г массы низкоуглеродистой стали при постоянном нагреве ее от 27 до 727 °С, составляет 473 Дж.

В УТБ ранее было сложно учесть такой характер изменения теплосодержания с ростом температуры нагрева, поэтому для упрощения расчетов было предложено использовать усредненную теплоемкость.

После определения величины энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, необходимой для ввода в межэлектродную зону, по закону Джоуля-Ленца рассчитывается требуемый сварочный ток:

$$I_{\text{CB}} = \sqrt{Q_{\text{ЭЭ}} / (k R_{\text{ЭЭ}} \tau_{\text{CB}})} . \quad (1.12)$$

Расчетная формула (1.12) учитывает изменение сопротивления межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}}$ в процессе сварки через коэффициент k ($k = 1$ – для низкоуглеродистых сталей; $k = 1,15$ – для алюминиевых и магниевых сплавов;

$k = 1,2$ – для коррозионно-стойких сталей; $k = 1,4$ – для титановых сплавов). Значения сопротивления межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}}$ и длительности протекания тока $\tau_{\text{СВ}}$ выбираются из рекомендаций, представленных в источниках литературы.

Вторым методом определения основных параметров режима КРС является опытно-экспериментальный. В соответствии с ним предварительно изготавливается целая партия однотипных деталей, на которых будут отрабатываться различные комбинации задаваемых параметров режима сварки: сварочный ток, длительность протекания тока, усилие сжатия электродов, форма и площадь контактной поверхности электродов. В этом случае предварительные расчеты параметров режима сварки не производятся. Принимается некий базовый режим сварки (конкретная комбинация вышеуказанных параметров), на котором сваривают несколько однотипных сварных соединений. Например, в [7] указывается, что для осуществления КРС какого-либо соединения из низкоуглеродистой стали первоначально опытным путем подбирается величина тока с учетом, что плотность тока обычно лежит в пределах $200...500 \text{ А/мм}^2$ для длительности протекания тока $\tau_{\text{СВ}} \approx 0,2 \text{ с}$, величина $\tau_{\text{СВ}}$ обычно составляет не более $0,5 \text{ с}$, усилие сжатия электродов $F_{\text{СВ}}$ подбирают по величине свариваемой площади с учетом, что удельное давление лежит в пределах $3...5 \text{ кг/мм}^2$. Первоначально выбранный режим сварки может быть результатом многолетней производственной практики по изготовлению конкретных соединений.

Если после сварки геометрия полученных рельефных сварных соединений удовлетворяет предъявляемым требованиям, то производят их механические испытания на срез, отрыв или продавливание, изготавливают несколько макрошлифов соединений, в случае необходимости проверяют твердость металла сварной точки, зоны термического влияния или основного металла на макрошлифе. Если в таком случае на макрошлифе отсутствуют недопустимые дефекты (непровары, трещины и др.), твердость металла соединения удовлетворительная и прочностные испытания подтверждают достаточную прочность соединений, то использованная комбинация параметров режима сварки принимается за основной режим КРС.

Если на макрошлифе присутствуют недопустимые дефекты, либо твердость металла соединений существенно завышена, либо соединения разрушились при малых нагрузках, то комбинация параметров режима сварки корректируется и весь процесс повторяется до тех пор, пока все требования, предъявляемые к соединению, не будут обеспечены.

Если геометрия полученных соединений не удовлетворяет предъявляемым требованиям (например, рельеф при сварке сдеформировался не на всю свою высоту и остался видимый зазор между деталями), то первоначальный режим сварки корректируется необходимое количество раз, пока геометрия соединения не будет обеспечена. После этого приступают к вышеприведенному

анализу макроструктуры, твердости и прочностных показателей полученных соединений.

Третьим методом определения основных параметров режима КРС (при сварке конкретных материалов определенной толщины) является выбор их по рекомендациям из источников литературы. Выбираются сварочный ток в килоамперах, длительность протекания тока в секундах, усилие сжатия электродов в ньютонах, а также форма и габариты контактной поверхности электродов. Недостатком данного метода является то, что многочисленные рекомендации в литературе существенно разнятся между собой. При этом в случае удачного выбора режима КРС невозможно понять, оптимален он или нет в вопросе энергоэффективности, например, дефектов может не быть, а энергопотребление сварочной машины из сети будет завышаться.

Следует отметить, что такие основные параметры режима КРС, как F_{CB} , τ_{CB} , $\tau_{CЖ}$, $\tau_{ПР}$, а также количество импульсов I_{CB} , во всех случаях не рассчитываются. Они либо выбираются по рекомендациям из источников литературы, либо определяются опытно-экспериментальным путем.

Анализ и сравнение приведенных методов позволяют сделать вывод о том, что для расчета основных параметров режима КРС, адекватно учитывающих теплосодержание металла свариваемых деталей и электродов, а также для повышения энергоэффективности данного процесса необходима переработка существующего УТБ путем пересмотра теоретических основ, определяющих процесс введения энергии в межэлектродную зону.

1.4 Проблематика расчета уравнения теплового баланса применительно к случаю КРС

Применительно к процессу контактной рельефной сварки проблематика расчета УТБ состоит в трех его особенностях [48].

Во-первых, расчет полезной энергии $Q_{П}$, затрачиваемой непосредственно на формирование зоны взаимного расплавления деталей, основан на предположении, что условный столбик металла будущей точки расплавляется полностью (всем своим объемом достигает температуры плавления свариваемых деталей $T_{ПЛ}$ при нагреве).

Во-вторых, расчет энергии теплоотвода в основной металл свариваемых деталей $Q_{М}$ основан на предположении, что условное кольцо металла вокруг будущей точки всем своим объемом нагревается до $0,25T_{ПЛ}$.

В-третьих, расчет энергии теплоотвода в электроды $Q_{Э}$ основан на предположении, что условные столбики материала электродов над и под точкой всем своим объемом нагреваются до $0,125T_{ПЛ}$.

Если совместить предполагаемые размеры сварной точки (задаваемые в УТБ), а также макрошлиф и срез реальной точки, полученной при контактной



рельефной сварке на режимах в соответствии с УТБ, то очевидным является несоответствие этих размеров (рисунок 1.19).

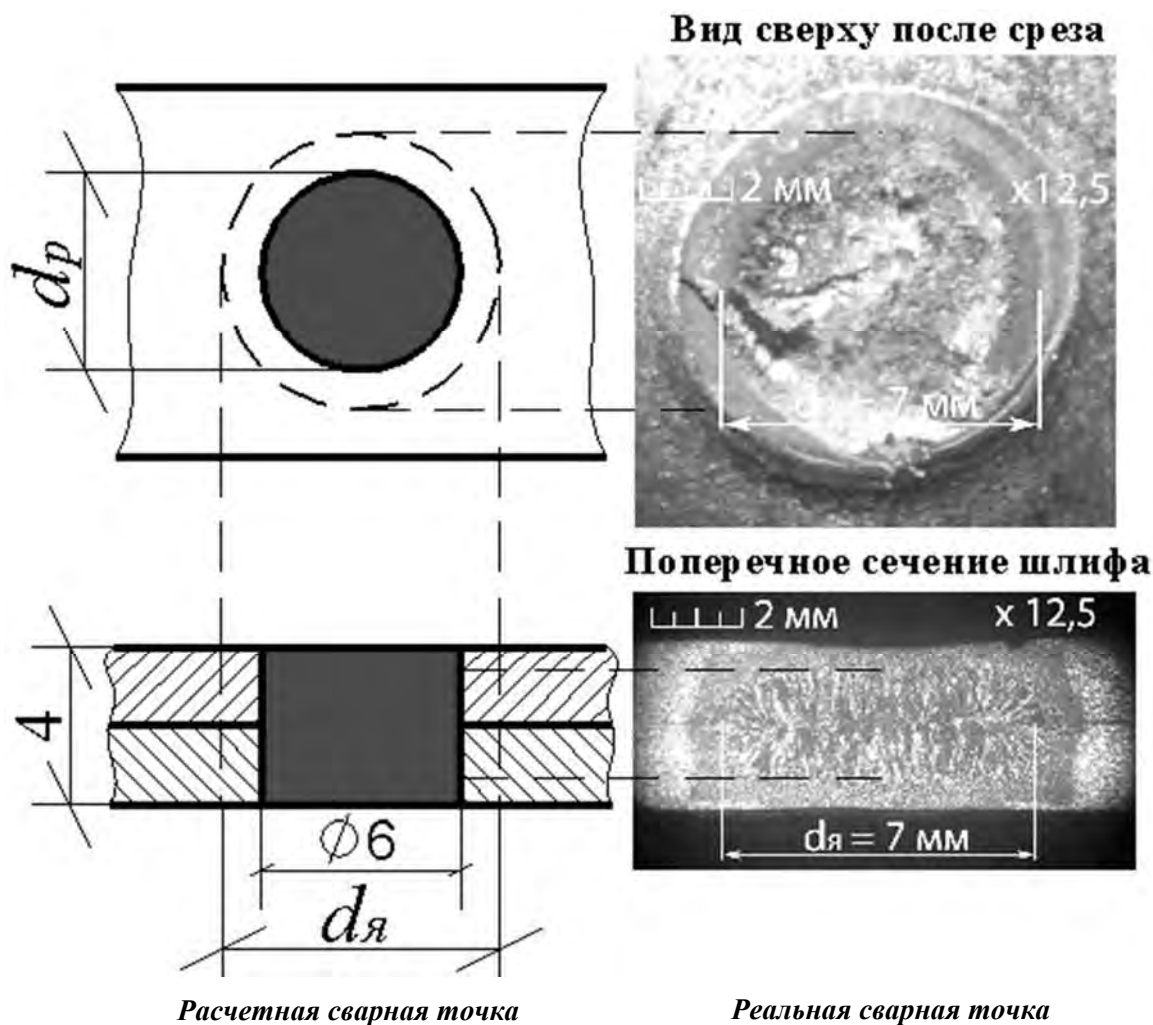


Рисунок 1.19 – Сравнение расчетной (по УТБ) и реальной сварных точек при КРС двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм по одному круглому выштампованному рельефу 6 × 1,2 мм ($d_я$ – диаметр литого ядра)

В частности, предполагаемый цилиндрический объем расплавления металла деталей V_P в горизонтальной плоскости расчетной точки ограничивается диаметром рельефа d_P , а в реальной точке этот объем имеет переменное сечение с уменьшением площади от центра к краям. В вертикальной плоскости реальной точки объем V_P не ограничивается наружными поверхностями свариваемых деталей, как это принято в расчете (с запасом).

Это свидетельствует о том, что при КРС на режимах в соответствии с УТБ при вводе в межэлектродную зону расчетной $Q_{ЭЭ}$ определенная ее часть расходуется на дополнительный теплоотвод в основной металл и электроды.

Несмотря на это, для упрощения расчетов по УТБ исследователями было принято, что при КТС и КРС тонколистового металла предполагаемая зона взаимного расплавления металла деталей имеет форму цилиндра,

ограничиваемого суммарной толщиной деталей $n\delta$, при точечной сварке – диаметром контактной поверхности электрода $d_{\text{э}}$ (при двух одинаковых электродах), при рельефной сварке – диаметром самого рельефа d_p .

Однако если при КТС полученная литая зона на макрошлифе в поперечном сечении отдаленно напоминает прямоугольник со сторонами, близкими по размерам к вышеуказанным ($n\delta$ и $d_{\text{э}}$), что соответствует представлениям о цилиндрической форме зоны взаимного расплавления деталей (рисунок 1.20, а), то при КРС – нет (рисунок 1.20, б).

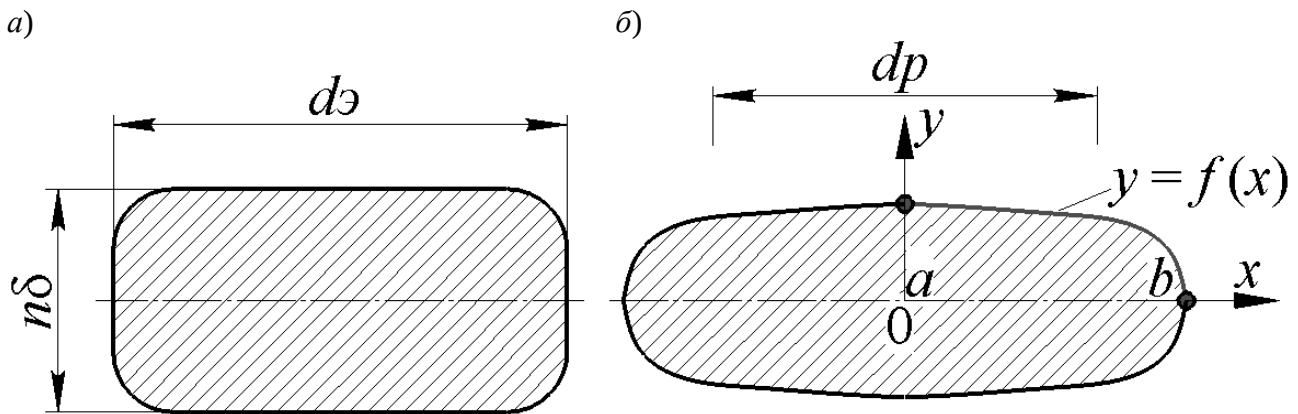


Рисунок 1.20 – Форма поперечного сечения литой зоны при контактной точечной (а) и рельефной сварке (б)

Геометрическая форма литой зоны рельефных сварных соединений напоминает объемный эллипсоид [49].

Таким образом, можно сделать вывод, что применительно к случаю КРС при расчете УТБ необходимо более точно учитывать габариты предполагаемой зоны взаимного расплавления деталей (объем металла деталей, нагреваемого до $T_{\text{пл}}$).

Этого можно добиться, либо применяя конечно-элементное моделирование электротермодеформационных процессов, происходящих в межэлектродной зоне при КРС, либо анализируя геометрию реальных макрошлифов указанных соединений.

Рассмотрим геометрию двадцати осесимметричных макрошлифов одностипных рельефных сварных соединений пластин из низкоуглеродистой стали толщиной $2 + 2$ мм, полученных при КРС по одному круглому выштампованному рельефу габаритами $6 \times 1,2$ мм на режимах в соответствии с УТБ: $I_{\text{св}} = 15$ кА; $\tau_{\text{св}} = 0,28$ с и $F_{\text{св}} = 3,6$ кН [45]; $R_{\text{ээ}} = 100$ мкОм (значение определялось экспериментально). На макрошлифах зоны взаимного расплавления металла деталей можно разбить на четыре равные части и определить достаточное количество точек приближенных кривых, ограничивающих одну часть. Если в программе TABLE CURVE 2D совместить между собой кривые,

после чего осуществить их аппроксимацию, то с высокой степенью достоверности (коэффициент детерминации $R^2 = 0,99967786$) можно определить функцию, описывающую полученную усредненную кривую ($y = a + bx + cx^{0,5} + de^{-x}$) (рисунок 1.21) [50]:

$$y = -4,9741427 - 2,619674x + 9,6496336x^{0,5} + 4,9817613e^{-x}. \quad (1.13)$$

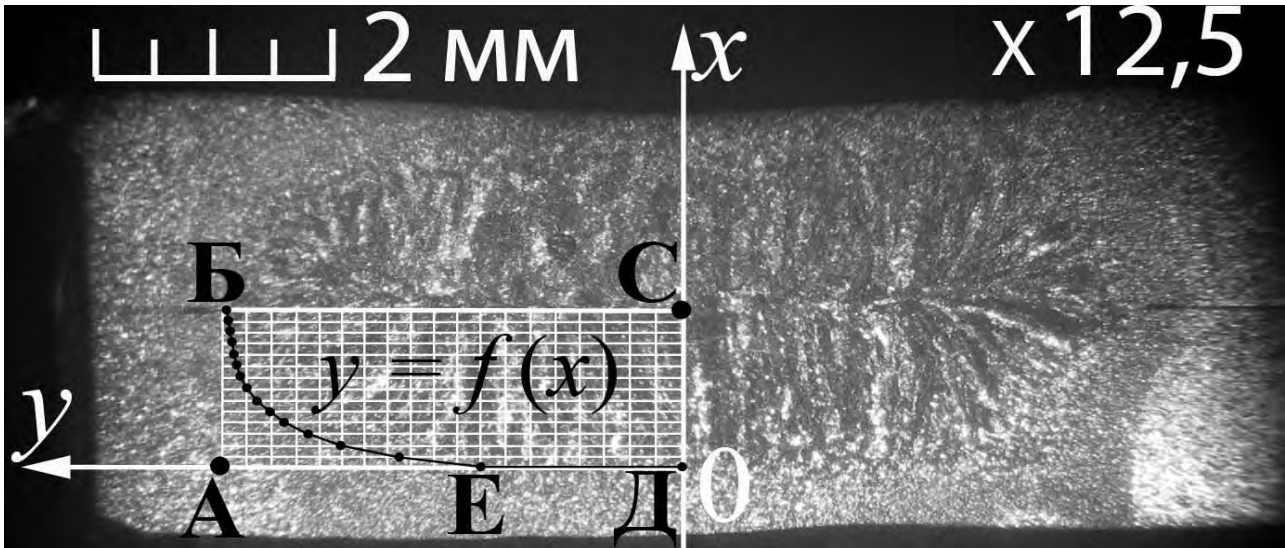


Рисунок 1.21 – Принцип определения функции $y = f(x)$ для кривой, ограничивающей четверть реальной рельефной сварной точки в поперечном сечении макрошлифа

Вращением данной функции вокруг соответствующей координатной оси может быть получена фигура с объемом в половину объема литой зоны:

$$V_{1/2} = \pi \int_a^b f^2(x) dx, \quad (1.14)$$

где a и b – пределы интегрирования функции $y = f(x)$;

x – глубина проплавления одной детали $h_{\text{ПР1Д}}$.

Затем вычисляется объем всей литой зоны $V = 2V_{1/2}$.

С учетом этого формула расчета составляющей $Q_{\text{П}}$ в уравнении теплового баланса видоизменится и для случая КРС двух деталей равной толщины она примет следующий вид:

$$Q_{\text{П}} = 2\pi \int_0^{h_{\text{ПР1Д}}} f^2(x) dx c_M \gamma_M T_{\text{ПЛ}}. \quad (1.15)$$

Таким образом, заранее зная некое минимальное значение параметра $h_{\text{ПР1Д}}$, обеспечивающее достаточную прочность соединения, а также теплофизические

характеристики металла свариваемых деталей, можно с высокой степенью точности оценить полезную энергию, затрачиваемую на формирование зоны взаимного расплавления металла деталей при КРС. Такой подход вносит корректировку и в формулу расчета составляющей Q_M в УТБ, т. к. высота условного кольца теплоотвода в основном металл будет меньше суммарной толщины двух деталей $\delta_1 + \delta_2$ и равняться $2h_{ПР1Д}$. Соответственно, для случая КРС двух деталей равной толщины формула примет вид:

$$Q_M = 0,5\pi X_M (d_P + X_M) h_{ПР1Д} K_1 c_M \gamma_M T_{Пл}. \quad (1.16)$$

При этом можно оценить энергию $Q_{МДОП}$, которая должна затрачиваться на дополнительный теплоотвод в неучтенную часть объема основного металла свариваемых деталей. На рисунке 1.21 участок АБЕ очерчивает площадь, определяющую данную часть объема. Результаты конечно-элементного моделирования процесса КРС соединений схожих толщин, представленные в [51–53], дают основание полагать, что средняя температура теплоотвода через соответствующие части объема основного металла составляет не ниже $0,5T_{Пл}$. С учетом расчета значения этого объема энергию, затрачиваемую на дополнительный теплоотвод, можно рассчитать по формуле

$$Q_{МДОП} = 0,5 \left[0,5\pi d_{Я}^2 h_{ПР1Д} - 2\pi \int_0^{h_{ПР1Д}} f^2(x) dx \right] K_1 c_M \gamma_M T_{Пл}, \quad (1.17)$$

где $d_{Я}$ – диаметр литого ядра (см. рисунок 1.19).

Площади контактов поверхностей свариваемых деталей и массивных электродных плит (или специальных электродов с увеличенными площадями контакта под КРС) составляют десятки квадратных сантиметров. При КРС теплоотвод из межэлектродной зоны в токоподводящие электроды (плиты), приводящий к их прогреву до температуры около $0,125T_{Пл}$, происходит по объемам электродного металла, существенно меньшим в сравнении с объемами, ограничиваемыми площадями контактов электрод–деталь. Для электрода 1, контактирующего с деталью 1, на которой рельеф отсутствует, этот объем ограничивается площадью круга d_K , имеющего диаметр d_1 , на несколько миллиметров превышающий диаметр рельефа d_P . Для электрода 2, контактирующего с деталью 2, на которой предварительно выштампован круглый рельеф, этот объем ограничивается площадью кольца с внутренним диаметром $d_{ВН}$, равным диаметру рельефа d_P , и внешним диаметром d_1 . Если принять $d_1 = d_P + \Delta$ (где Δ – величина превышения диаметра рельефа в круговом или кольцевом контактах электрод–деталь), то формула расчета составляющей $Q_Э$ в УТБ примет вид:

– для контакта электрод–деталь 1:

$$Q_{\varnothing} = 0,03125\pi(d_p + \Delta)^2 Y_{\varnothing} K_2 c_{\varnothing} \gamma_{\varnothing} T_{\text{пл}}; \quad (1.18)$$

– для контакта электрод–деталь 2:

$$Q_{\varnothing} = 0,03125\Delta\pi(2d_p + \Delta) Y_{\varnothing} K_2 c_{\varnothing} \gamma_{\varnothing} T_{\text{пл}}. \quad (1.19)$$

В конечном счете для КРС двух пластин по одному круглому выштампованному рельефу УТБ примет развернутый вид:

$$\begin{aligned} Q_{\varnothing\varnothing} = & 2\pi \int_0^{h_{\text{пр1д}}} f^2(x) dx c_M \gamma_M T_{\text{пл}} + 0,5\pi X_M (d_p + X_M) h_{\text{пр1д}} K_1 c_M \gamma_M T_{\text{пл}} + \\ & + 0,5 \left[0,5\pi d_{\text{я}}^2 h_{\text{пр1д}} - 2\pi \int_0^{h_{\text{пр1д}}} f^2(x) dx \right] K_1 c_M \gamma_M T_{\text{пл}} + \\ & + 0,03125\pi(d_p + \Delta)^2 Y_{\varnothing} K_2 c_{\varnothing} \gamma_{\varnothing} T_{\text{пл}} + 0,03125\Delta\pi(2d_p + \Delta) Y_{\varnothing} K_2 c_{\varnothing} \gamma_{\varnothing} T_{\text{пл}}. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Для решения такого УТБ применительно к конкретным материалам необходимо предварительно устанавливать закономерности между толщиной свариваемой детали δ и:

- достаточной глубиной проплавления одной детали $h_{\text{пр1д}}$;
- требуемым диаметром ядра $d_{\text{я}}$;
- параметром Δ .

Отличие реальных геометрий литых зон рельефных соединений от расчетных подтверждается результатами конечно-элементного моделирования процесса сварки пакетного нахлесточного соединения пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм по одному круглому выштампованному рельефу диаметром 6 мм на наружных деталях (рисунок 1.22). Форма смоделированной точки схожа с реальным шлифом и отличается от расчетной по УТБ (по аналогии с рисунком 1.19) [51].

При этом, согласно общепринятой методике, перед расчетом УТБ параметр $\tau_{\text{св}}$ первоначально выбирается по рекомендациям из источников литературы, которые существенно разнятся. Например, для КРС соединения, состоящего из двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм (при сварке по одному круглому выштампованному рельефу габаритами 6 × 1,2 мм), рекомендуемое значение $\tau_{\text{св}}$ составляет: 0,25...0,35 с по А. С. Гельману (1952) [3]; 0,3...0,5 с по В. А. Гилевичу (1976) [4]; 0,32 с по В. П. Березиенко (2009) [1];

0,28 с по А. И. Гуляеву (1985) [45]; 0,5 с по Б. Д. Орлову (1986) [6] (таблица 1.1).

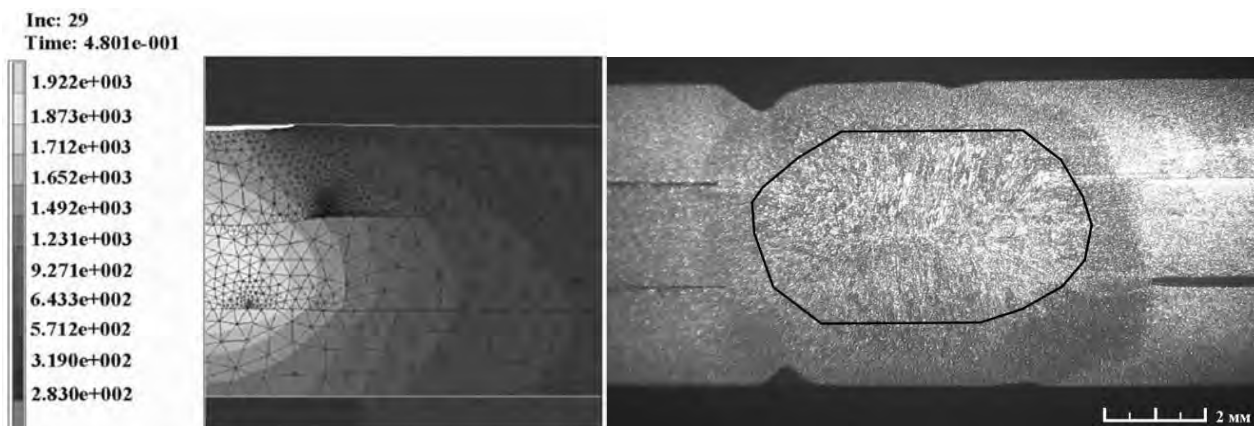


Рисунок 1.22 – Сравнение шлифа и результата моделирования процесса КРС пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм в среде MSC.MARC (температура в градусах Цельсия; сплайном очерчена зона расплавления металла)

Таблица 1.1 – Рекомендуемые значения тока I_{CB} и длительности его протекания τ_{CB} при сварке пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм (по одному круглому выштампованному рельефу)

Источник рекомендаций	τ_{CB} , с	I_{CB} , кА	P_{CP} , кН
А. С. Гельман (1952)	0,25...0,35	9...10	15
В. А. Гилевич (1976)	0,3...0,5	11...12,5	
А. И. Гуляев (1985)	0,28	11,8	
Б. Д. Орлов (1986)	0,5	11...12	
К. А. Кочергин (1987)	Принимать по рекомендациям 1952–1986 гг.		
В. В. Смирнов (2000)	0,28...0,68	6,4...11,8	
М. Д. Банов (2009)	0,18...0,24	10...11,5	
В. П. Березиенко (2009)	0,32	13	

С другой стороны, в литературе величина рекомендуемого сварочного тока I_{CB} ранее существенно занижалась в сравнении с расчетной по УТБ, что объяснялось отсутствием в то время на многих заводах сварочных машин достаточной мощности для обеспечения расчетных токов сварки. В связи с этим пониженная прочность сварных соединений при их испытании статическим нагружением на срез принималась предприятиями в качестве приемлемой (таблицы 1.1 и 1.2) (P_{CP} – усилие разрушения при срезе).

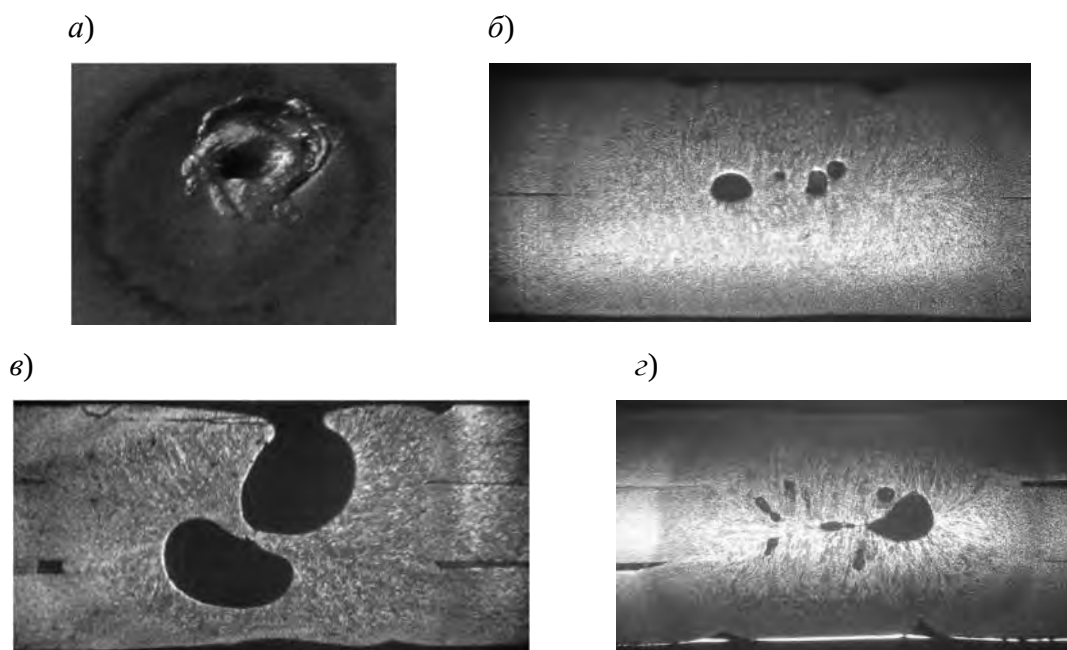
Необходимо отметить, что первоначально УТБ было разработано и применено к процессу точечной сварки, после чего многие исследователи

предложили использовать его и для рельефной сварки, отождествляя эти процессы. Однако корректировок, связанных с динамикой изменения сопротивления межэлектродной зоны $R_{ЭЭ}$ как наиболее трудноанализируемого в процессе нагрева при наличии рельефа, в УТБ внесено не было.

Таблица 1.2 – Значения тока I_{CB} и длительности его протекания τ_{CB} при КРС пластин из низкоуглеродистой стали толщиной $2 + 2$ мм (по одному круглому выштампованному рельефу) в соответствии с УТБ

Методика расчета тока	τ_{CB} , с	I_{CB} , кА	P_{CP} , кН
По УТБ	0,28	15	19

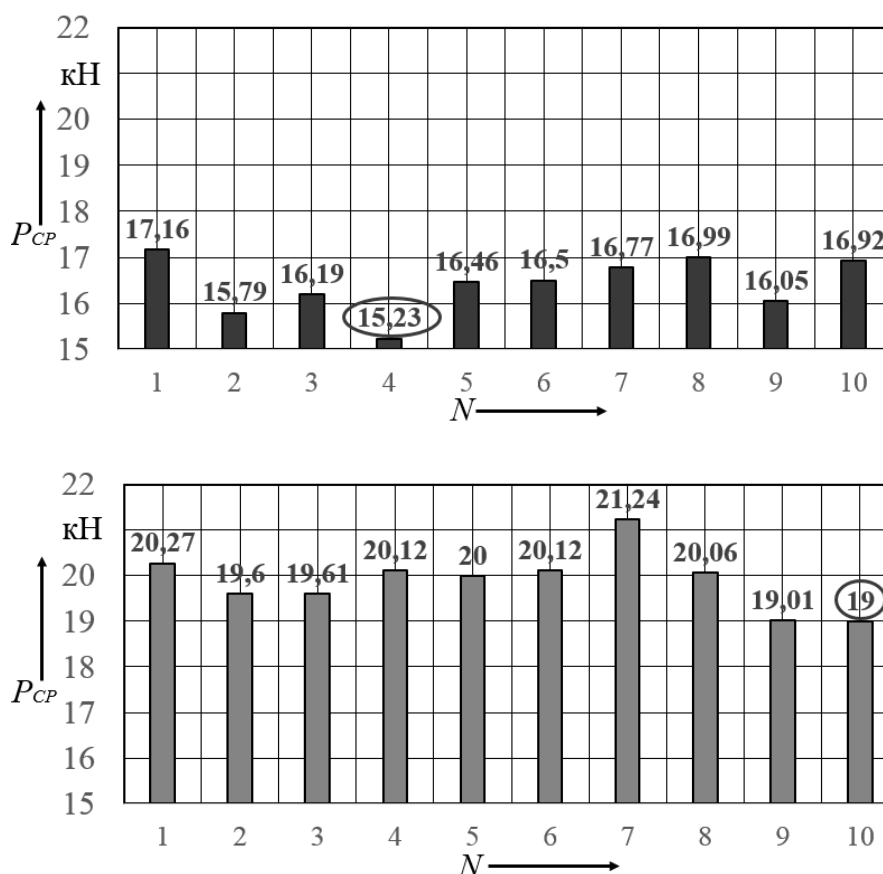
По причине вышеуказанного при КРС нахлесточных соединений возрастает уровень их дефектности в связи с повышенной склонностью к образованию начальных внутренних выплесков расплавленного металла из межэлектродной зоны, т. к. режимы сварки не оптимизированы с точки зрения тепловложения (рисунок 1.23).



a – прожог; b – порообразование; v – порообразование с прожогом; z – рыхлоты и раковины

Рисунок 1.23 – Дефекты КРС от начального внутреннего выплеска при завышении тепловложения

Об этом свидетельствует статистика прочностных испытаний соединений, полученных при КРС на рекомендуемых режимах и в соответствии с расчетом по УТБ (рисунок 1.24).



a – при КРС с заданием тока по рекомендациям А.И. Гуляева; *б* – при КРС с заданием тока в соответствии с УТБ; N – номер образца

Рисунок 1.24 – Статистика прочностных испытаний на срез рельефных нахлесточных соединений (две детали из стали 08кп толщиной 2 + 2 мм, габариты рельефа 6 × 1,2 мм)

В ряде случаев указанные дефекты существенно уменьшают технологическую прочность соединений (при воздействии эксплуатационных нагрузок). Например, если визуально наблюдать процесс роботизированной КТС или КРС элементов кузовов легковых автомобилей, то можно заметить, что почти в каждом цикле сварки сразу после включения импульса тока из-под электродов вылетают искры, представляющие собой выплескиваемый расплавленный металл, мгновенно кристаллизующийся на воздухе. Во избежание снижения прочности отдельных сварных точек производители в таком случае вынужденно увеличивают их общее количество в ущерб экономической целесообразности.

1.5 Сопротивление межэлектродной зоны при КРС

Перед началом процесса КРС (электроды сварочной машины разведены) межэлектродная зона представляет собой участок между верхним (подвижным) и нижним (неподвижным) электродами или электродными плитами (см. рисунок 1.10). В этом понимании понятие «межэлектродная зона» является

условным и включает в себя объемное пространство между контактами верхний электрод–верхняя деталь и нижний электрод–нижняя деталь.

Непосредственно в процессе сварки, когда электроды сжимают свариваемые детали и далее отрабатывается циклограмма КРС, межэлектродная зона представляет собой проводящую электрическую цепь в пространстве вторичного контура контактной машины.

Данная цепь обладает сопротивлением R_{Σ} и включает в себя:

- полное собственное сопротивление свариваемых деталей (при их малых габаритах) или его часть (при их значительных габаритах в соизмерении с размерами электродов);
- контактные сопротивления (деталь–деталь и электрод–деталь).

При предварительном сжатии деталей (перед пропусканием тока через них) межэлектродная зона обладает так называемым «начальным холодным» сопротивлением. Его величина непостоянна, значительно варьируется от сварки к сварке и может изменяться от нескольких сотен до тысяч микроом. Она определяется суммарным холодным сопротивлением контактов электрод–деталь и деталь–деталь (зависят от размеров микровыступов на поверхностях деталей и электродов), а также собственным сопротивлением деталей (холодным).

При КРС по круглому выштампованному рельефу приложении разности потенциалов к межэлектродной зоне со стороны вторичной обмотки сварочного трансформатора приводит к возникновению линий протекания тока.

Ток протекает как между электродами и деталями, так и между самими деталями. Однако по отношению с КТС площади контактов электрод–деталь значительны по размеру и относительно постоянны по величине в сравнении с площадью контакта деталь–деталь. По этой причине теплоотвод через контакты электрод–деталь определяется преимущественно длительностью протекания импульса тока и его величиной, а не динамикой изменения сопротивления всей межэлектродной зоны.

Соответственно, наибольшее влияние на процесс тепловложения в межэлектродную зону оказывает динамика изменения сопротивления в контакте деталь–деталь (существенно зависящая от усилия сжатия электродов).

При этом сопротивление в контакте деталь–деталь по величине должно превышать значения остальных составляющих сопротивления межэлектродной зоны, что является обязательным условием максимального тепловыделения именно в этом контакте (между деталями) [7].

В начальный момент пропускания тока через детали линии его протекания концентрируются преимущественно по вершине рельефа (рельефов), ввиду чего в контакте деталь–деталь возникает повышенная плотность тока. Сопротивление межэлектродной зоны при этом резко возрастает, т. к. площадь контакта деталь–деталь минимальна (имеет круглую форму) и удельное электро-

сопротивление металла деталей r_d увеличивается при нагреве (этап I) [54]. Например, нагрев углеродистой стали до температуры плавления приводит к росту r_d в 8...10 раз [55]. Это сопровождается ростом тепловыделения в данном контакте по закону Джоуля-Ленца, который длится непродолжительное время – несколько периодов сетевого напряжения. Перегрев металла в контакте деталь–деталь вызывает деформирование рельефа и увеличение площади контакта. Металл встречной детали также начинает деформироваться, в результате чего происходит выдавливание оксидных пленок из контакта деталь–деталь на периферию в радиальном направлении. В результате в контакте деталь–деталь образуются ювенильные (активированные) поверхности.

Дальнейшее пропускание тока, характеризующееся нарастанием импульса, приводит к более интенсивному деформированию рельефа и дальнейшему его внедрению в металл встречной детали. Сопротивление межэлектродной зоны начинает резко уменьшаться ввиду роста площади контакта деталь–деталь (этап II).

При этом часть металла рельефа выдавливается в зазор между деталями в радиальном направлении, в результате чего образуется поясok и падение сопротивления межэлектродной зоны может замедляться (этап III).

Линии протекания тока из центра контакта деталь–деталь смещаются к периферии и концентрируются по кольцевой зоне, ширина и площадь которой растут по мере деформирования рельефа. При этом нагрев в центре контакта деталь–деталь (в круговой зоне) падает незначительно и условия для дальнейшего объемного взаимодействия металла свариваемых деталей в контакте деталь–деталь обеспечиваются по всей его площади.

После полного смятия рельефа, когда зазор между деталями приближается к нулю и площадь контакта деталь–деталь максимальна, падение сопротивления межэлектродной зоны замедляется (этап IV) и вплоть до момента выключения тока данный параметр почти не изменяется (этап V).

Вышеуказанный механизм изменения сопротивления межэлектродной зоны имеет место в условиях КРС, близких к идеальным: детали хорошо зачищены перед сваркой, рельеф имеет осесимметричную форму без дефектов, при сварке отсутствуют колебания напряжения питающей сети более $\pm 10\%$ [15], привод сжатия контактной машины обладает минимальной инерционностью срабатывания, электроды хорошо охлаждаются и зачищены, вторичный контур контактной машины и рельеф обладают достаточной жесткостью, импульс тока не является крутонарастающим и т. д. В таком случае кривая изменения R_{Σ} включает все вышеуказанные этапы и выглядит так, как показано на рисунке 1.25 [4].

В реальных условиях КРС, когда имеют место многочисленные возмущающие воздействия, сопротивление контакта деталь–деталь изменяется непредсказуемо в каждом отдельном цикле. Это обуславливает различный характер ввода энергии в межэлектродную зону.

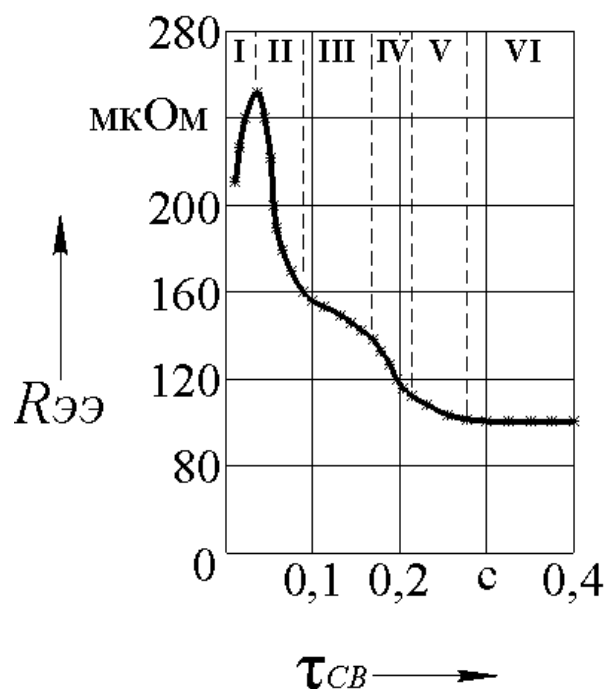


Рисунок 1.25 – Кривая поэтапного изменения сопротивления межэлектродной зоны $R_{ээ}$ (при КРС деталей толщиной 2 + 2 мм по одному круглому рельефу)

На рисунке 1.26 представлена одна из возможных кривых изменения $R_{ээ}$ в процессе сварки соединений, состоящих из двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм (по одному круглому выштампованному рельефу габаритами 6 × 1,2 мм), зарегистрированная аналого-цифровым устройством сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS NI USB 6251 и формализованная в график средой графического программирования LABVIEW 2010.

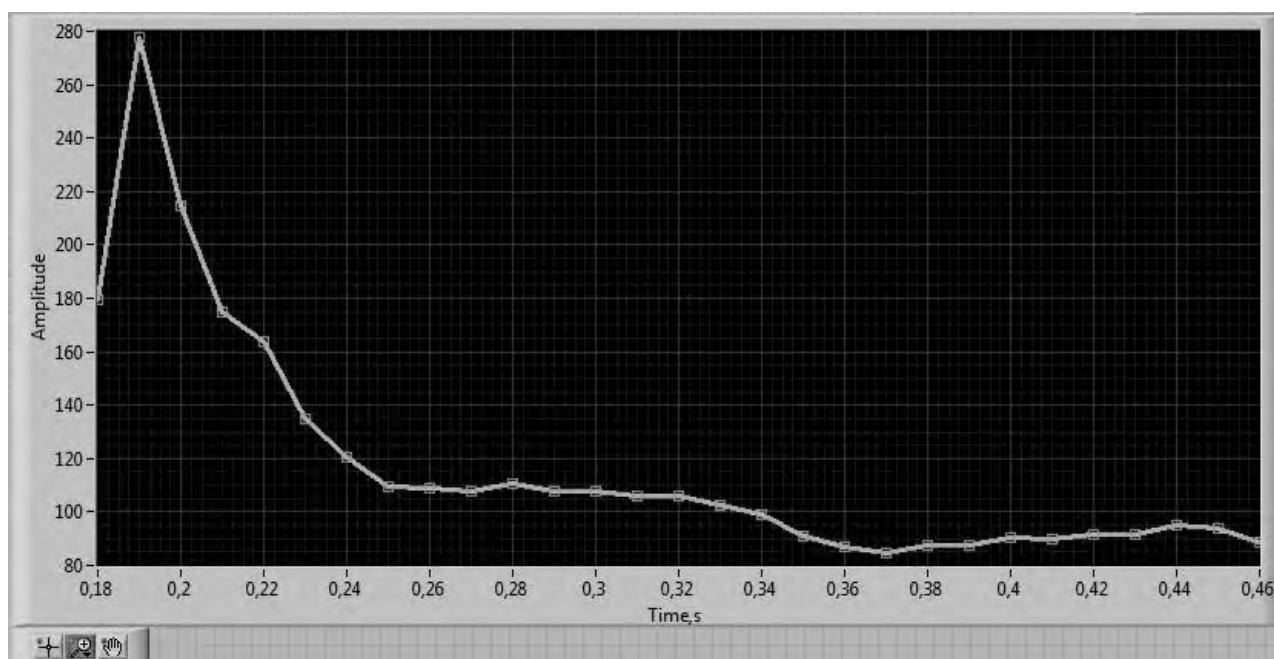


Рисунок 1.26 – Кривая изменения сопротивления межэлектродной зоны $R_{ээ}$, зарегистрированная при сварке ($I_{CB} = 15$ кА; $\tau_{CB} = 0,28$ с; $F_{CB} = 3,6$ кН)

Как правило, на начальном этапе процесса сварки вышеуказанный резкий скачок $R_{ЭЭ}$ (см. рисунки 1.25 и 1.26) происходит за время не более 0,05 с от момента включения тока, что объясняется крутонарастающим характером импульса. За это время рельеф деформируется на всю свою высоту, и энергия вводится в межэлектродную зону скачкообразно.

В результате стремительного «схлопывания» рельефа площадь контакта деталь–деталь значительно вырастает, и на протяжении подавляющей части оставшейся длительности протекания импульса тока энергия вводится в межэлектродную зону по завышенной площади контакта.

Это приводит к снижению сопротивления межэлектродной зоны и к соответствующему уменьшению вводимой энергии по закону Джоуля-Ленца, несмотря на некоторый рост действующего сварочного тока вплоть до момента его выключения. Происходящее при этом снижение плотности тока увеличивает теплоотвод из контакта деталь–деталь, что не позволяет обеспечить эффективное объемное взаимодействие металла свариваемых деталей в конце процесса сварки. Вероятно, именно с этим связано отличие геометрической формы реальной и расчетной (по УТБ) литых зон (см. рисунок 1.19).

На данный момент существующие системы автоматического управления процессами КРС и КТС не позволяют в режиме реального времени обеспечивать характер изменения параметра $R_{ЭЭ}$, близкий к кривой, изображенной на рисунке 1.25. По мнению исследователей контактной сварки, данный параметр является одним из наиболее трудноанализируемых.

1.6 Структура рельефных сварных соединений, получаемых с взаимным расплавлением металла свариваемых деталей

Весь процесс КРС, как правило, занимает не более 1 с. Длительность протекания импульса тока $\tau_{СВ}$ обычно не превышает 0,5 с. Таким образом, в сравнении с дуговыми способами сварки данный процесс является крайне быстротечным. Кратковременность нагрева межэлектродной зоны в совокупности с мощным теплоотводом в свариваемые детали и электроды обуславливают высокую скорость охлаждения металла, достигающую более 7500 °С в секунду [7]. С одной стороны, это приводит к уменьшению зоны термического влияния (ЗТВ) и снижению градиента напряжений в сварном соединении, с другой – повышает вероятность образования закалочных структур металла, особенно при сварке сталей с повышенным содержанием углерода, ликвирующих примесей и легирующих элементов.

При КРС нахлесточных соединений из низкоуглеродистой стали на режимах в соответствии с рекомендациями из источников литературы на начальной стадии процесса (первые пять периодов сварки) можно выделить три зоны формирующегося соединения: внутреннюю 1 (определяемую контактом



вершины рельефа с металлом встречной детали); кольцевую 2 (окружающую внутреннюю зону); наружную 3 (окружающую кольцевую зону) (рисунок 1.27).

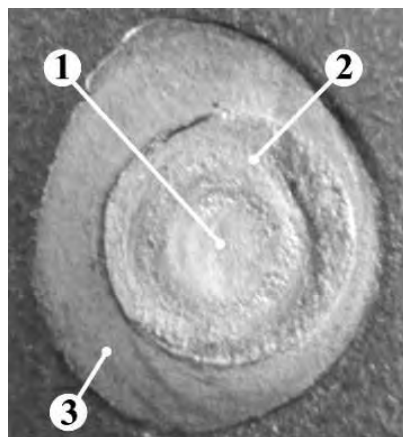


Рисунок 1.27 – Зональная структура рельефного соединения на начальной стадии процесса сварки (срез соединения пластин толщиной 2 + 2 мм по одному круглому выштампованному рельефу после $\tau_{CB} = 0,1$ с)

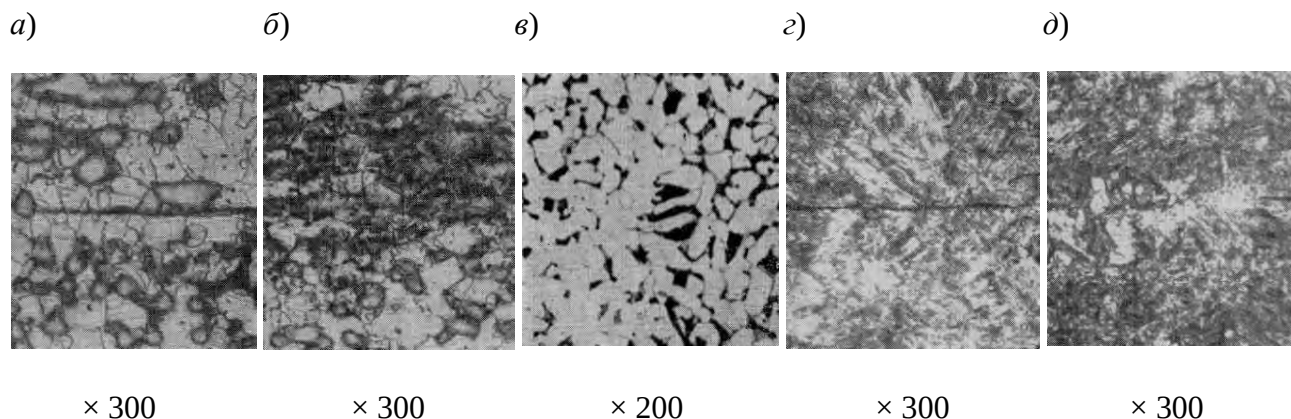
Микроструктура внутренней и кольцевой зон схожа и представляет собой ферритное поле с островками мартенсита, окруженного каемками бейнита (рисунок 1.28, а, б) [4]. Это является свидетельством того, что на начальной стадии процесса сварки, т. е. через 0,1 с после включения тока, фактическая температура нагрева металла в контакте деталь–деталь не успевает значительно превысить температуру α – γ -превращения. При этом кольцевая зона характеризуется большим количеством бейнита, что косвенно указывает на нагрев металла до более высокой температуры в сравнении с внутренней зоной. Наружная зона ввиду повышенного теплоотвода прогревается существенно меньше, поэтому здесь либо сохраняется ферритно-перлитная структура основного металла (рисунок 1.28, в) [56], либо имеет место ферритное поле с вкраплениями мартенсита.

Дальнейшее кратковременное пропускание тока через детали (еще три периода сварки) нагревает металл до температуры, позволяющей получить преимущественно бейнитную структуру во всех трех рассматриваемых зонах (рисунок 1.28, з, д) [4].

Когда температура нагрева внутренней и кольцевой зон приближается к температуре плавления металла свариваемых деталей, непосредственно в кольцевой зоне, а также в обоих направлениях от нее начинают образовываться и расти общие дендриты (зерна), вытягивающиеся в радиальном направлении противоположно теплоотводу.

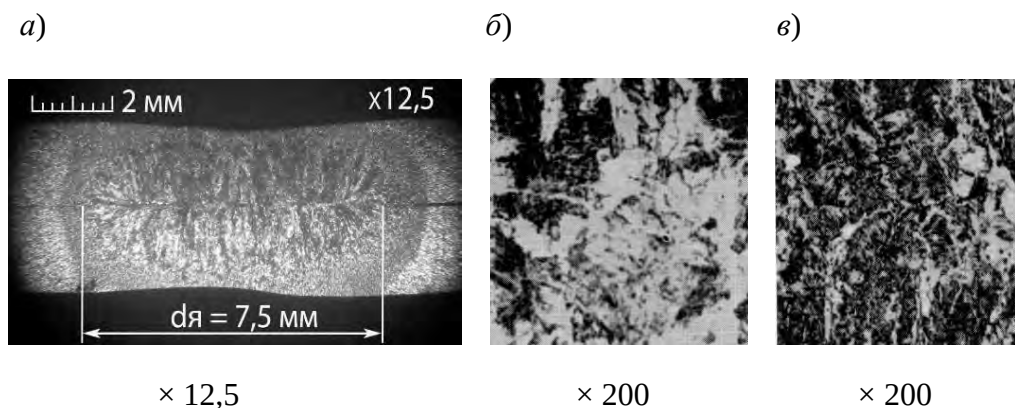
На протяжении дальнейшего пропускания тока вплоть до его выключения формируется и растет соединение деталей в виде ядра ферритно-бейнитной структуры (рисунок 1.29, а). Скорость охлаждения металла в центре ядра

меньшая, чем по краям, поэтому количество феррита здесь большее (рисунок 1.29, б) [56]. Периметр зоны термического влияния вокруг ядра к концу процесса сварки сохраняет преимущественно бейнитную структуру (рисунок 1.29, в).



а, б, в – внутренняя, кольцевая и наружная зоны при $\tau_{CB} = 0,1$ с; г, д – внутренняя и кольцевая зоны при $\tau_{CB} = 0,16$ с

Рисунок 1.28 – Микроструктура металла в начале процесса КРС



а – дендритное ядро; б – центр ядра; в – граница ядра

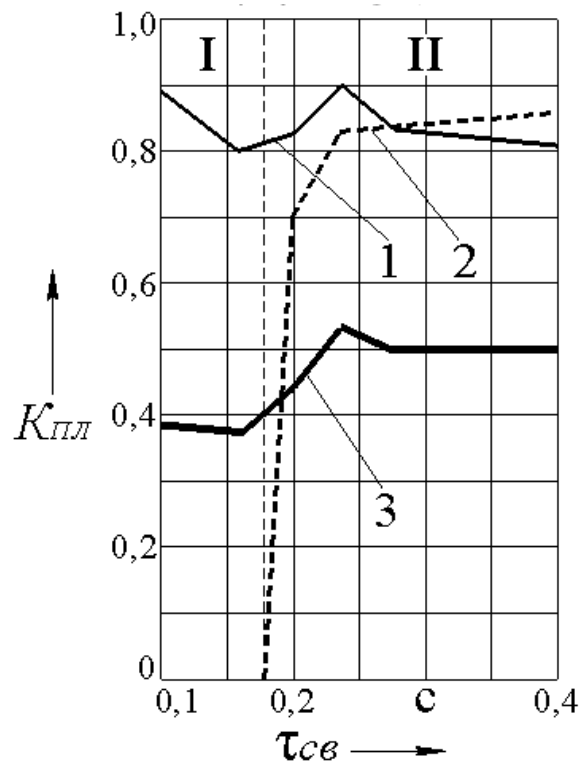
Рисунок 1.29 – Макро- и микроструктура соединения в конце процесса КРС

1.7 Рельефные сварные соединения в твердой фазе, получаемые без взаимного расплавления металла свариваемых деталей

В литературе по контактной сварке в качестве одного из важных преимуществ КРС перед КТС упоминается возможность получения соединений в твердой фазе, т. е. без расплавления металла свариваемых деталей в контакте деталь–деталь межэлектродной зоны [4, 45]. Причем соединение может быть выполнено либо с полным отсутствием зон взаимного расплавления металла деталей, либо при их наличии и чередовании с твердофазными участками [15, 57, 58].

Исследователи указывают, что при схожих возмущающих воздействиях на межэлектродную зону точечные соединения обладают значительно меньшей прочностью в сравнении с рельефными, особенно в начале процесса сварки [23, 59, 60]. Это в основном связывают с большей степенью высокотемпературной совместной пластической деформации металла в контакте деталь–деталь при КРС, создающей более благоприятные условия для интенсификации граничной диффузии [1, 37].

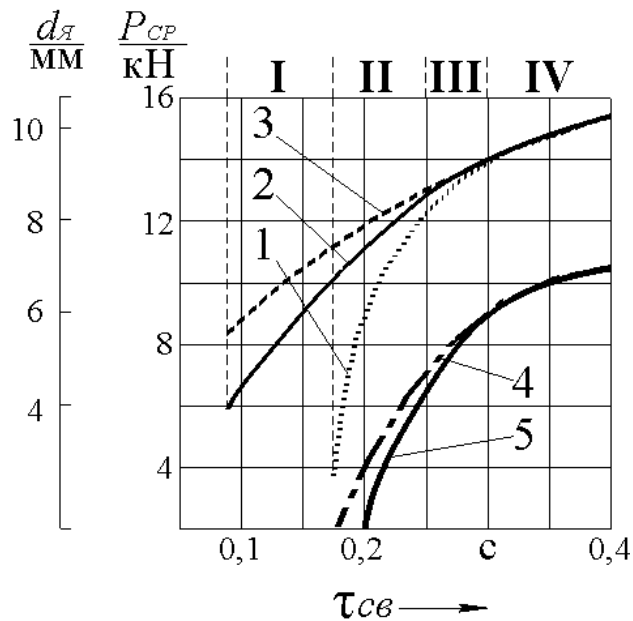
При этом для соединений из низкоуглеродистой стали достоверно установлено, что коэффициент пластичности, представляющий отношение прочности на отрыв к прочности на срез, у рельефных соединений без расплавления не ниже ($K_{ПЛ} = 0,8...0,9$ для стали с 0,06 % углерода) или незначительно ниже ($K_{ПЛ} = 0,4...0,5$ для стали с 0,12 %), чем у точечных ($K_{ПЛ} = 0,7...0,85$) (рисунок 1.30). Причем до появления литого ядра точечные соединения характеризуются $K_{ПЛ}$, близким к нулю (этап I), а для рельефных соединений в таком случае $K_{ПЛ} \geq 0,35$ [4].



1, 2 – при КРС и КТС стали с 0,06 % углерода соответственно; 3 – при КРС стали с 0,12 % углерода

Рисунок 1.30 – Изменение $K_{ПЛ}$

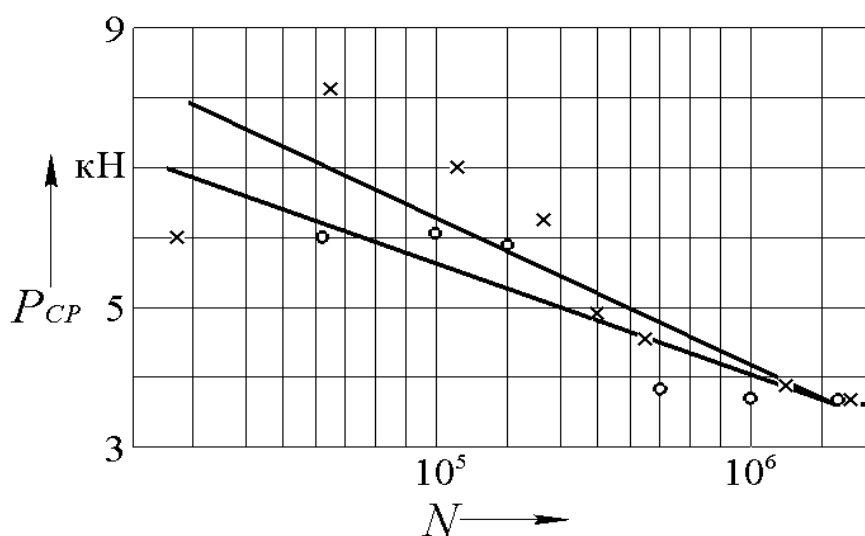
На рисунке 1.31 представлены кривые изменения разрушающей нагрузки $P_{СР}$ при испытании точечных и рельефных (по одному круглому рельефу) сварных соединений на статический срез, а также диаметра литого ядра $d_{Я}$ при сварке пластин толщиной 2 + 2 мм.



1 – при КТС без проковки (P_{CP}); 2, 3 – при КРС без проковки и с проковкой соответственно (P_{CP}); 4, 5 – при КТС и КРС соответственно ($d_{Я}$)

Рисунок 1.31 – Изменение усилия среза и диаметра литого ядра

Кроме того, имеется информация о высокой стойкости рельефных сварных соединений без расплавления к воздействию динамических нагрузок, что объясняется общеизвестным фактом концентрации напряжений в околошовной зоне, по которой во всех случаях нагружения происходит разрушение соединений независимо от наличия/отсутствия в них развитого литого ядра (рисунок 1.32) [4].



о – при сварке с расплавлением металла деталей; × – при сварке в твердой фазе;
 N – количество циклов нагружения

Рисунок 1.32 – Кривые усталости рельефных сварных соединений

Точечные соединения с литым ядром минимального диаметра (до 2 мм) не обладают существенной прочностью и разрушаются при нагрузках 4...6 кН (начало этапа II на рисунке 1.31), а рельефные соединения без ядра при этом выдерживают P_{CP} не менее 10 кН (этапы I и II на рисунке 1.31).

1.8 Постадийный механизм образования рельефных сварных соединений: образование твердой фазы и взаимное расплавление металла деталей с появлением общих зерен

Согласно общим представлениям, металл имеет поликристаллическую решетчатую структуру с расположением атомов в соответствующих узлах либо в междоузлиях. Например, α -железо имеет восемь узловых и один объемно-центрированный атом в каждой кубической ячейке кристаллической решетки (рисунок 1.33).

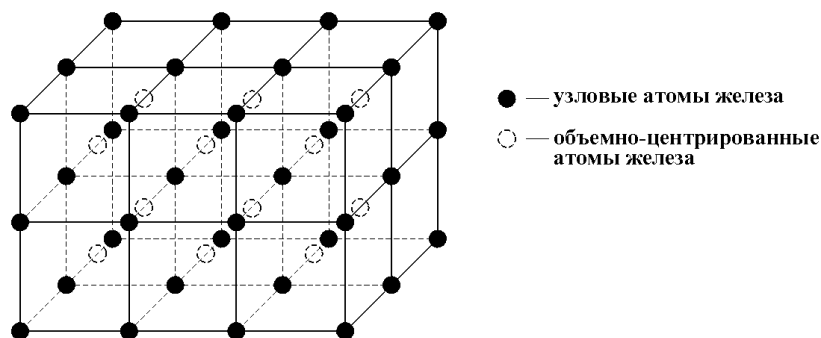


Рисунок 1.33 – Объемно-центрированная кубическая решетка поликристалла α -железа

Относительно устойчивое структурное состояние любого металла как массивного металлического поликристалла при комнатной температуре обеспечивается свободными межатомными связями как внутри отдельных его кристаллов, так и между ними.

Данные связи обусловлены взаимодействием имеющих у атомных ядер скоплений электронов (электронные облака), которые структурно состоят из энергетических уровней (с электронами). Энергетические уровни делятся на внутренние, более близкие к ядру, и внешний. В рамках каждого энергетического уровня электроны движутся по своим орбитам. На внутренних уровнях электроны ограничены в свободе перемещения относительно орбит за счет большей энергии связи с ядром. Например, атом железа состоит из положительно заряженного ядра из 26 протонов и 30 нейтронов, вокруг которого по четырем орбитам движутся 26 электронов (рисунок 1.34).

На внешнем (наиболее отдаленном) уровне связь электронов с ядром минимальна (валентные электроны), и при определенных внешних воздействиях они могут смещаться со своей орбиты в сторону от ядра.

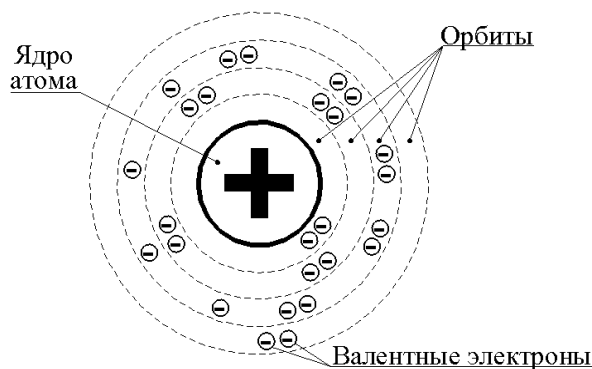


Рисунок 1.34 – Строение атома железа

Любой металл как массивный металлический поликристалл имеет внутренний объем и наружную поверхность. Атомы, расположенные на поверхности, имеют меньшее количество связей в сравнении с атомами внутри поликристалла. Например, на рисунке 1.35 поверхностный атом 1 (незаштрихованная область) в одной плоскости имеет связь с пятью атомами (2...6), а внутренний атом 2 (заштрихованная область) – с восемью атомами (1, 3...9).

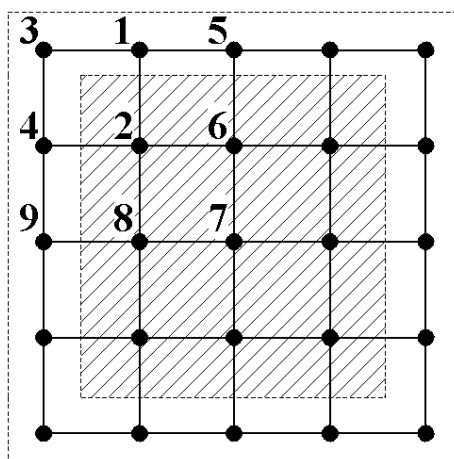


Рисунок 1.35 – Объемно-центрированная кубическая кристаллическая решетка α -железа (вид спереди одной плоскости)

Это приводит к поверхностному натяжению и появлению у поверхностных атомов избытка энергии, которые усиливаются массой несовершенств структуры кристалла как внутри, так и на его поверхности (вакансии, дислокации и другие дефекты строения).

Таким образом, поверхностные атомы реального металла (не идеального) в большей или меньшей степени всегда находятся в возбужденном состоянии, а степень этого возбуждения зависит от заготовительных операций, состояния обработки поверхности и теплофизических свойств металла, температуры окружающей среды и т. д.

Участки металла с поверхностными атомами, находящимися в возбужденном состоянии, являются своеобразными центрами повышенной активности электронов (так называемые центры активации). Именно на этих участках и созданы наиболее благоприятные условия для образования общих электронных конфигураций. Однако для этого необходимо сблизить данные участки металлов на определенное расстояние с целью усиления их поверхностного межэлектронного взаимодействия.

Принудительное сближение центров активации двух металлов на расстояние порядка периода решетки ($R_{01} = a = 2...4$ нм) приводит к тому, что валентные электроны поверхностных атомов вступают во взаимодействие за счет слабых межмолекулярных сил притяжения Ван дер Ваальса (энергия образования $0,2...2$ ккал/моль), причем далее силы притяжения и отталкивания уравниваются (рисунок 1.36, а) [61]. Внешние энергетические уровни электронных облаков поверхностных атомов, содержащие определенное количество валентных электронов, начинают интенсивно расширяться и взаимно перекрываться. После перекрытия валентные электроны начинают двигаться по общим (гибридным) орбитам, т. е. обобществляются (рисунок 1.36, б). Этот процесс можно рассматривать как образование физического контакта между атомами двух металлов [62].

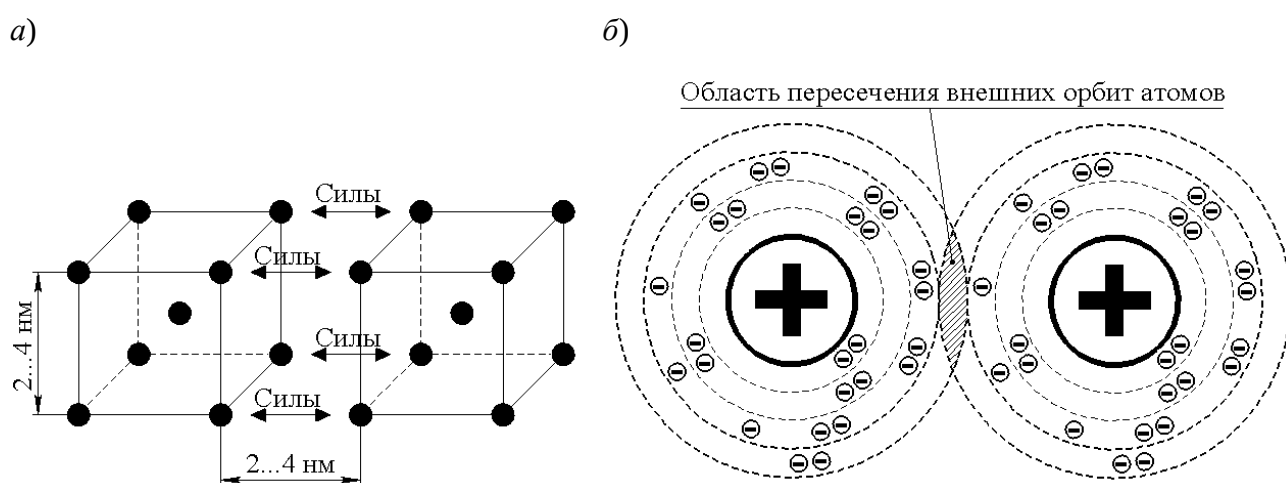
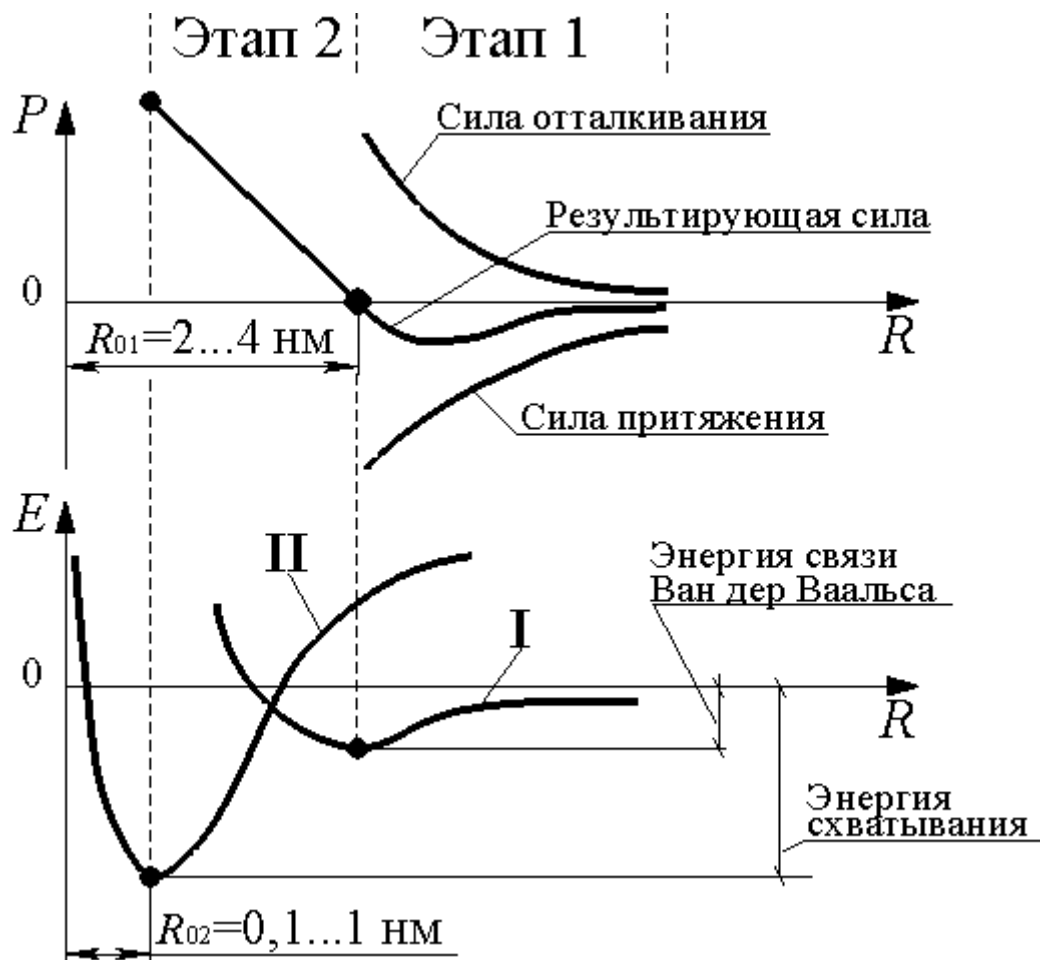


Рисунок 1.36 – Схема возникновения физического взаимодействия между поверхностными атомами кристаллов решетки α -железа (а) при пересечении их внешних орбит (б)

Дальнейшее сближение центров активации на расстояние $R_{02} = 10^{-10}...10^{-9}$ м и менее приводит к значительному увеличению сил межатомного притяжения (происходит химическое взаимодействие по своей природе), в результате чего возникают энергетически устойчивые конфигурации электронов, характерные для невозбужденных атомов внутри металла.

Потенциальная энергия рассматриваемой системы достигает своего минимума (рисунок 1.37). Граница раздела между соединяемыми металлами исчезает, и происходит их схватывание за счет образования общих (металлических) связей (энергия образования ≥ 20 ккал/моль). Причем чем меньше количество валентных электронов у поверхностных атомов взаимодействующих центров активации, тем выше склонность металлических поликристаллов (металлов) к химическому взаимодействию между собой.



I – образование первичной связи; II – схватывание; P – сила; E – потенциальная энергия; R – межатомное расстояние

Рисунок 1.37 – Этапы взаимодействия поверхностных атомов двух металлов при их сближении

Если рассматривать такой способ сварки давлением, как контактная рельефная сварка, то прочность общих связей, образующихся между двумя соединяемыми металлами, определяется не только количеством устойчивых конфигураций электронов поверхностных атомов, возникших на площади контакта деталь–деталь после вдавливания рельефа в металл встречной детали. Если бы все происходило таким образом, то в результате сварки рельеф сохранил бы свою геометрическую форму и между деталями сохранился бы

недопустимый зазор, хотя, теоретически, полученное соединение и могло бы обладать минимальной прочностью в условиях полного отсутствия окислов на деталях перед сваркой и при очень большой длительности процесса их сжатия (как при холодной сварке).

В реальных же условиях сварки поверхности деталей окислены даже при хорошей зачистке. Наличие окислов снижает количество центров активации на сближаемых поверхностях, особенно при кратковременности процесса их начального сжатия электродами и малой начальной площади контакта деталь–деталь (определяемой лишь вершиной рельефа). Это препятствует образованию общих связей у соединяемых металлов.

При этом рельеф должен внедриться в тело встречной детали, деформируясь почти на всю высоту после сильного вдавливания либо после нагрева до высокой температуры и перехода в пластическое состояние.

При КРС, по аналогии с КТС, после предварительного сжатия рельеф одновременно и нагревается импульсом тока, и воспринимает усилие сжатия со стороны электродов. Это приводит к пластической деформации не только рельефа, но и металла встречной детали. Благодаря этому появляется возможность, во-первых, существенно повысить количество центров активации на сближаемых поверхностях, во-вторых, получить дополнительные центры активации в подповерхностных слоях металла.

Это становится возможным благодаря наличию в кристаллической решетке дислокаций. Дислокации – это линии, вдоль и вблизи которых нарушено правильное расположение атомных плоскостей, характерное для кристалла. При значительной пластической деформации металла, наряду с имеющимися дислокациями, расположенными с плотностью $10^6 \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (в силу дефектности кристаллического строения металла), возникают новые, которые при своих взаимных перемещениях способны приводить к отрывам атомов и переходу их в новые положения (разрываются старые связи и образуются новые). Этот процесс сопровождается возбуждением всех участвующих и близлежащих атомов, т. к. в данной реакции участвуют все атомы, расположенные в зонах заметных упругих искажений кристаллических решеток. Это приводит к образованию новых центров активации и их взаимодействию. Данный процесс постепенно распространяется от поверхностных слоев вглубь металла и принимает объемный характер.

Попутный, даже кратковременный, нагрев металла приводит к термической активации, обусловленной преимущественно процессами поверхностной, а также объемной диффузии (между металлами деталей) и самодиффузии (в металлах деталей). Процессы диффузии и самодиффузии ведут к выравниванию концентраций атомов в рамках возникающих общих устойчивых поликристаллических структур металла по всему объему, подвергающемуся нагреву и деформированию. С ростом температуры нагрева термическая

активация усиливается, что связано с повышением частоты колебаний атомов металла, особенно в местах дислокационных перемещений.

Диффузионное перераспределение атомов приводит к упрочнению отдельных объемов поликристаллических структур металла в контакте деталь–деталь при его нагреве до температуры $T = (0,3...0,5)T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления металла), а при дальнейшем нагреве металла до $T = (0,5...1,0)T_{пл}$ возможны четыре случая:

1) дополнительное упрочнение возникших поликристаллических структур металла по всему объему нагрева в рамках площади контакта деталь–деталь без образования общих дендритных зерен (твердая фаза), т. к. процессы рекристаллизации не успевают произойти. Характерно для малой длительности нагрева свыше температуры рекристаллизации;

2) дополнительное упрочнение возникших поликристаллических структур металла лишь по части объема нагрева в рамках площади контакта деталь–деталь без образования общих дендритных зерен. В объеме металла, ограничиваемом кольцевой зоной контакта деталь–деталь, твердая фаза образуется, а в объеме металла, ограничиваемого внутренней зоной, – нет (см. рисунок 1.27). Характерно для чрезмерно малой длительности нагрева свыше температуры рекристаллизации;

3) образование и рост новых (общих) дендритных зерен по всему объему нагрева в рамках площади контакта деталь–деталь в результате интенсивного процесса рекристаллизации. Характерно для большой длительности нагрева свыше температуры рекристаллизации. Направления роста зерен противоположны направлениям теплоотвода из межэлектродной зоны;

4) по объему нагрева металла в рамках кольцевой зоны площади контакта деталь–деталь наблюдается чередование участков твердой фазы и участков с общими дендритными зернами.

При приближении температуры нагрева металла к $T_{пл}$ происходит его кратковременное разупрочнение, однако процесс КРС крайне быстротечен и пребывание металла контакта деталь–деталь при температуре $T = (0,7...1,0)T_{пл}$ составляет, как правило, менее 1 с. При этом следует отметить, что при КРС нагрев металла до температуры, значительно превышающей температуру рекристаллизации, в целом облегчает получение прочных соединений за счет более интенсивной релаксации остаточных напряжений.

После выключения сварочного тока происходит кристаллизация общей зоны взаимного нагрева металла (с расплавлением) за время, не превышающее 1...3 с, что связано с ее малыми размерами и интенсивным теплоотводом в основной металл деталей и электроды. Применение последующих импульсов термообработки позволяет существенно снизить скорость охлаждения металла и предотвратить возможность образования закалочных структур (при сварке сталей и сплавов с повышенным содержанием углерода).



Если в ходе процесса КРС литая зона сформировалась в результате предварительного взаимного расплавления металла деталей с последующим образованием общих дендритных зерен по всему объему нагрева до температуры, достигающей температуры плавления металла, то принято считать, что требуемые размеры таких соединений регламентированы в ГОСТ 15878–79 в зависимости от толщины однотипных свариваемых листов [63]. Рекомендации основных параметров режима КРС, обеспечивающие данный результат, отражены в литературе по сварке давлением.

При этом следует отметить, что на данный момент в книгах и учебниках по контактной сварке отсутствуют рекомендации по режимам, обеспечивающим получение твердофазных рельефных соединений, имеющих статическую и динамическую прочность на уровне аналогичных соединений с наличием зоны взаимного расплавления металла деталей. Отсутствие данных рекомендаций не позволяет реализовать на практике резерв снижения энергоемкости процесса КРС, т. е. минимизировать энергопотребление сварочной контактной машины без ущерба прочности формируемых соединений.

Таким образом, по первому разделу монографии на основании вышеприведенного анализа данных, имеющихся в литературе, и производственных сведений можно сделать следующие выводы.

1 В рамках многолетней государственной политики по снижению материало- и энергоемкости производства очевидной является необходимость более широкого внедрения на промышленных предприятиях, имеющих в своем составе сборочно-сварочные цеха и участки, высокопроизводительного, безопасного и легко поддающегося автоматизации процесса КРС взамен трудоемких и затратных способов дуговой сварки при крупносерийном и массовом производстве различных конструкций из тонко- и среднетолщинного листового металла (от 1 до 5 мм).

2 Резерв снижения энергоемкости процесса КРС, под которой можно понимать соотношение «минимальное тепловложение в межэлектродную зону – достаточная прочность соединения», до сих пор не раскрыт.

3 Для снижения энергоемкости процесса КРС на основании анализа геометрий реальных макрошлифов рельефных соединений, полученных при сварке на расчетных режимах в соответствии с рекомендуемыми в литературе данными, разработано уравнение теплового баланса, отличное от общепринятого и позволяющее учесть объемно-эллипсоидную форму рельефной сварной точки через такие параметры, как глубина проплавления металла одной детали и диаметр литого ядра, а также более точно вычислить энергию, расходуемую на теплоотвод в металл свариваемых деталей и электродов по уточненной площади контакта электрод–деталь, что позволяет оптимизировать требуемую величину сварочного тока, рассчитываемую по

закону Джоуля-Ленца (как часть первого направления проводимых научных исследований).

4 При решении данной проблемы еще одним направлением исследований является работа с существующим уравнением теплового баланса применительно к процессу КРС и поиск путей оптимизации расчетной величины энергии, требуемой для ввода в межэлектродную зону (по уравнению теплового баланса), и, соответственно, величины энергопотребления сварочной контактной машины.

2 Разработка способа и средств снижения энергоемкости процесса КРС

2.1 Аппаратура управления процессом КРС

Общей особенностью сварочных машин и оборудования, используемых для КРС и КТС, является то, что всем процессом управляет единый прибор – регулятор цикла сварки (рисунок 2.1).

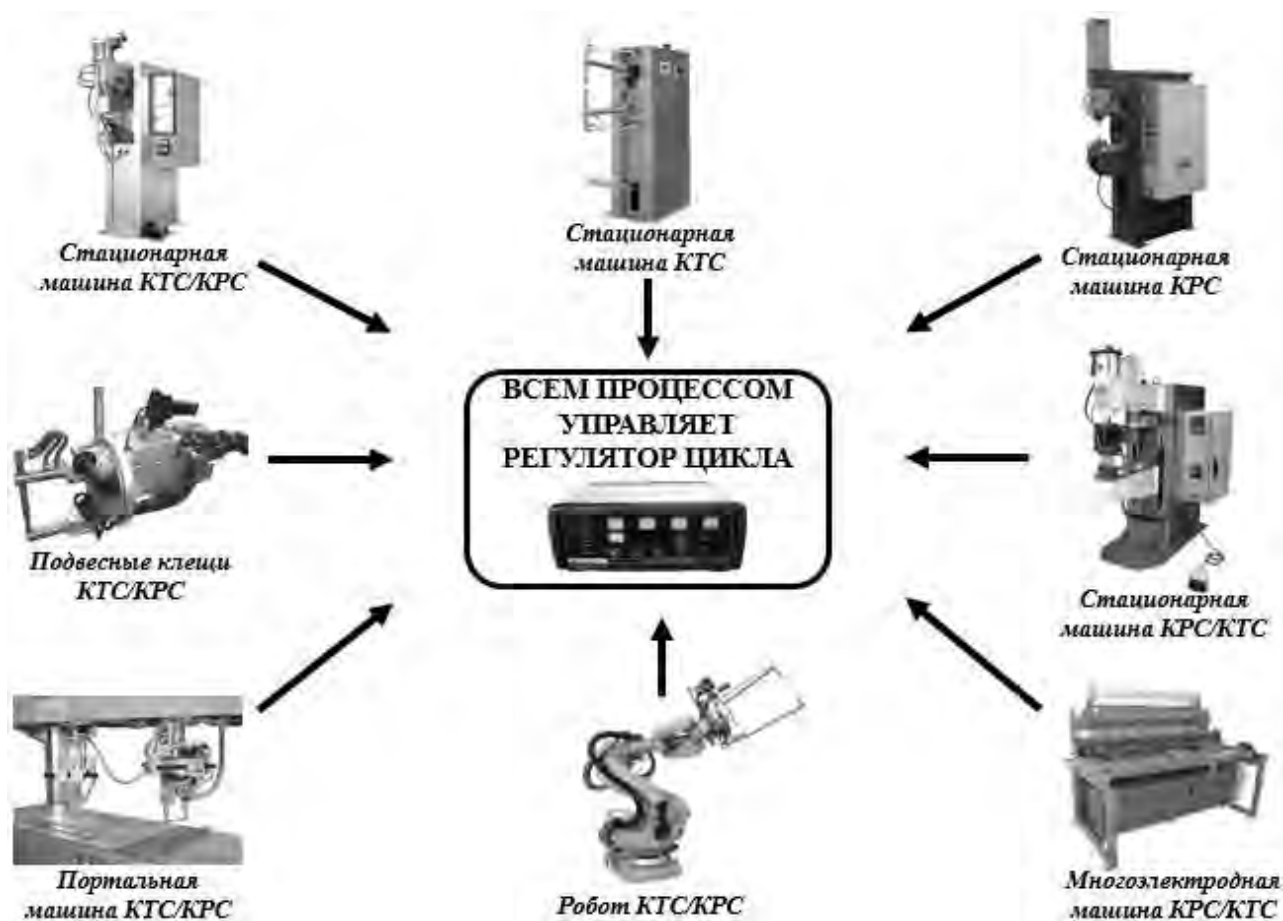
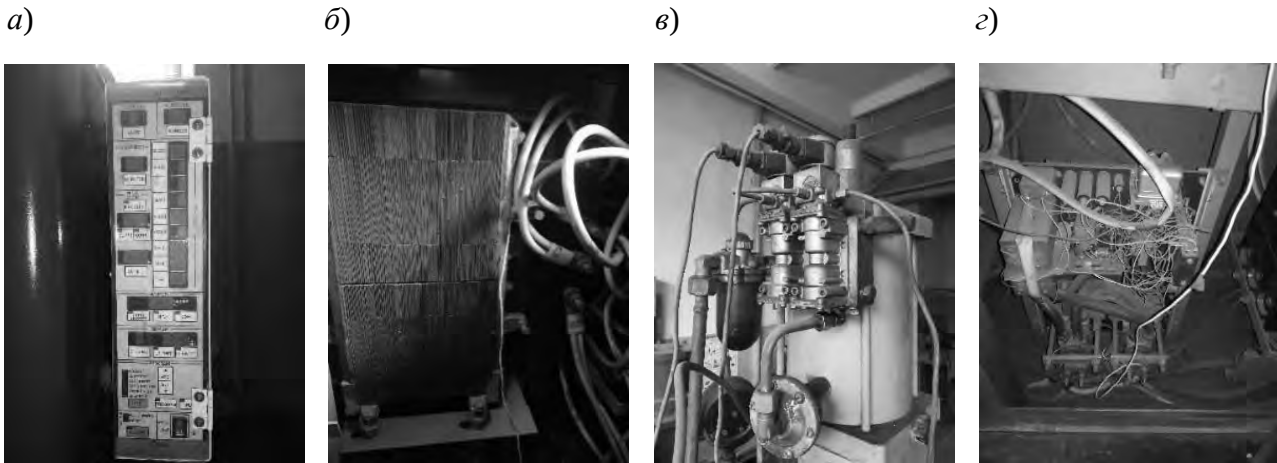


Рисунок 2.1 – Общая особенность оборудования, применяемого для контактной рельефной (КРС) и точечной сварки (КТС)

Для обеспечения взаимосвязи между регулятором цикла сварки (рисунок 2.2, а, б), сварочным источником питания (рисунок 2.2, в) и электропневмоклапанами привода сжатия электродов (рисунок 2.2, г) в составе сварочной машины имеются силовые тиристорные контакторы, высоковольтные конденсаторы, резисторы, импульсные трансформаторы, несколько многопозиционных клеммников и другие элементы (вспомогательная схема управления) (рисунок 2.2, д).

Регулятор цикла сварки вместе с указанными элементами компактно монтируются в виде шкафа управления сварочной машины.



а – регулятор цикла сварки типа CHOWEL WELCOM 020V; *б* – источник питания (здесь – трансформатор переменного тока); *в* – электропневмоклапаны; *г* – вспомогательная схема управления

Рисунок 2.2 – Аппаратура управления процессом КРС

Назначение регулятора цикла сварки состоит в обеспечении общей циклограммы процесса, параметры которого изначально настраиваются оператором (рисунок 2.3).

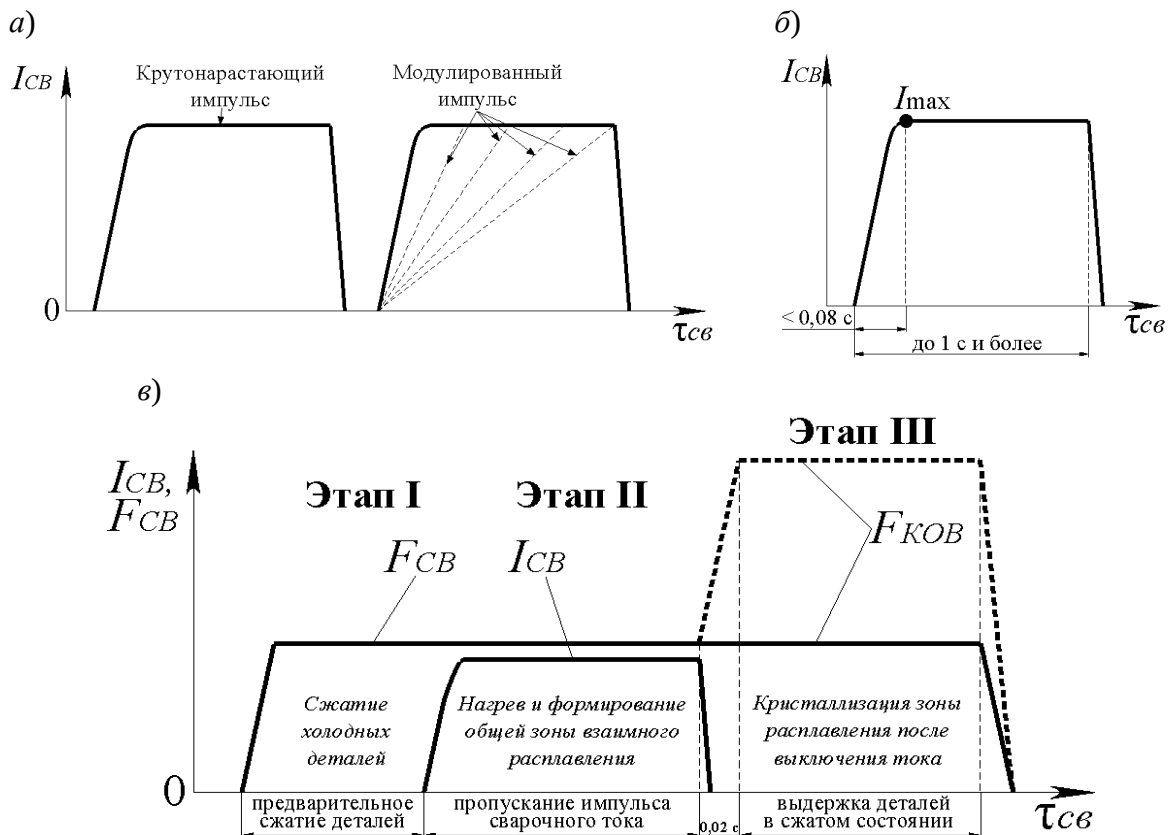


Рисунок 2.3 – Основные параметры режима (*а*, *б*) и общая циклограмма процесса (*в*), обеспечиваемые регулятором цикла сварки

Для простейшей циклограммы с постоянным приложением усилия сжатия электродов настраиваемые параметры следующие: величина импульса тока I_{CB} ; длительность протекания импульса тока τ_{CB} ; длительность предварительного сжатия деталей $\tau_{CЖ}$; длительность выдержки деталей в сжатом состоянии после выключения тока $\tau_{ПР}$ (проковка); пауза между циклами сварки $\tau_{П}$.

Усилие сжатия электродов F_{CB} и повышенное ковочное усилие $F_{КОВ}$ регулятором не задаются, а настраиваются с помощью редуктора, манометра и переводной таблицы пневмопривода контактной машины (переводит давление пневмоцилиндра p , кгс/см², в параметры F_{CB} , кН, и $F_{КОВ}$, кН).

Для предотвращения повреждений блока управления сварочной машины скачками тока предусмотрен автоматический выключатель, который расположен между сетевым рубильником и первичной цепью источника питания. Регулятор цикла сварки, как правило, заземляется на корпус сварочной машины.

2.2 Существующие системы и способы корректировки основных параметров режима КРС и точечной сварки

Первые системы и способы, позволяющие улучшить качество рельефных сварных соединений, получаемых при КРС в соответствии с режимами, рекомендуемыми в литературе, появились только после продолжительного изучения самого процесса КРС.

В середине 40-х гг. XX в. учеными J. M. Gerken, W. F. Hess, W. J. Childs, E. F. Nippes было доказано, что изменение основных параметров режима КРС влияет на прочность формируемых соединений [64–66]. Ими были построены зависимости прочности рельефных соединений внахлестку от величины сварочного тока на примерах КРС двух тонких листов с круглыми сферическими и кольцевыми выштампованными рельефами (рисунок 2.4) [67].

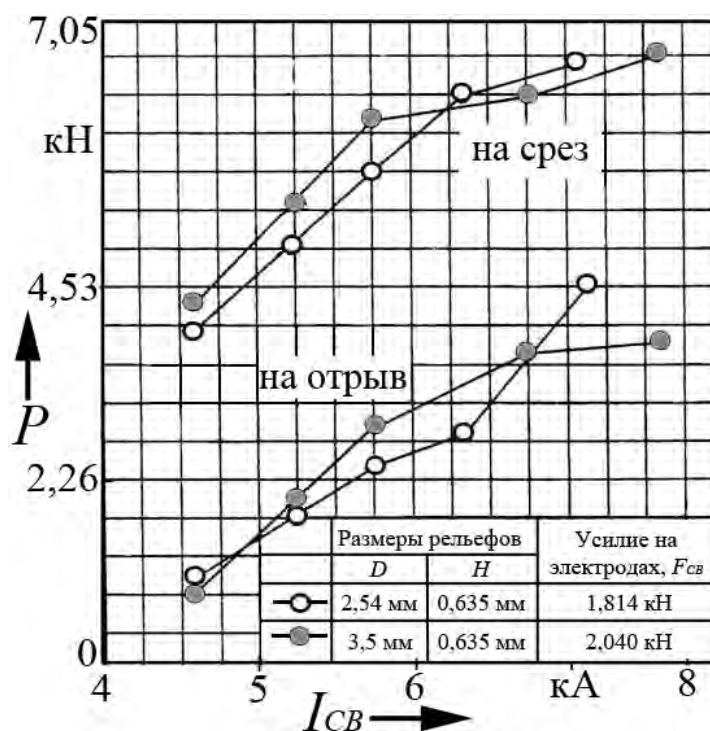
Затем в 60-х гг. XX в. учеными J. F. Harris и J. J. Riley были разработаны рекомендации по выбору основных параметров режима КРС соединений внахлестку, состоящих из двух деталей (низкоуглеродистая сталь), включая размеры круглых выштампованных рельефов [67]. В это же время A. Cunningham и M. L. Vegeman благодаря применению высокоскоростной съемки процесса КРС смогли проследить кинетику образования рельефного нахлесточного соединения, состоящего из двух деталей (изучались поперечные сечения соединений) [68].

За 50–80-е гг. XX в. А. С. Гельман, В. А. Гилевич и Б. Д. Орлов разработали теоретические основы процесса КРС (в отечественной науке) [3, 4, 6]. Исследование и практическое применение процесса КРС в массовом производстве осуществили А. И. Гуляев, М. Липа, Я. Голасек, Н. В. Подола [7, 8, 37].

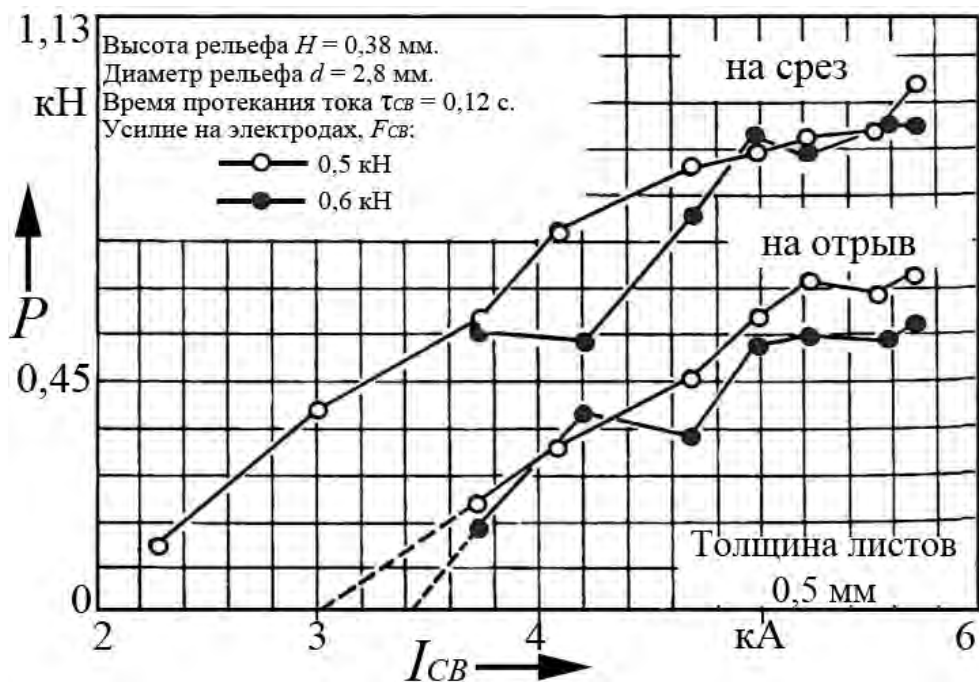
Рекомендации по Т-образной КРС различных соединений разработали и усовершенствовали Э. С. Каракозов, В. П. Березиенко и Т. И. Бендик [52, 69–73].



а)



б)



а – сварка листов из низкоуглеродистой стали по круглому сферическому рельефу (W. F. Hess, W. J. Childs); б – сварка листов из низколегированной стали по кольцевому рельефу (E. F. Nippes, J. M. Gerken)

Рисунок 2.4 – Зависимость усилия разрушения P рельефных сварных соединений от величины тока

Полученные многими учеными данные стали главными в выборе основных параметров режима КРС при дальнейшей разработке систем и способов их корректировки (для стабильного получения более качественных рельефных соединений).

Вопросами повышения стабильности качества соединений, формируемых при КРС и КТС, в последнее время занимаются такие ученые, как А. С. Климов, Э. А. Гладков и В. В. Смирнов [74–76]. Их публикации, в большей мере, связаны с особенностями работы силовой части и аппаратуры управления сварочных машин при реализации процессов КРС, КТС и контактной шовной сварки (далее – КШС), причем данные процессы ими рассматриваются именно как объекты управления. В статьях и книгах под их авторством описываются известные системы программного управления и автоматического регулирования основных параметров режима КРС, КТС и КШС, а также регуляторы цикла сварки и регуляторы отдельных параметров режима (величины сварочного тока, напряжения межэлектродной зоны и т. д.). При этом этими учеными широко затрагиваются темы фазового регулирования величины сварочного тока на контактных машинах и активного управления процессами КРС, КТС и КШС путем регулировки длительности включенного состояния силовых тиристоров λ .

Однако, как и другими исследователями данной области, ими подчеркивается проблематичность разработки систем, позволяющих управлять вышеуказанными процессами в реальном времени по параметру энергии, вводимой в межэлектродную зону. Следует отметить, что, несмотря на это, была высказана идея создания системы стабилизации величины тепловыделения в контакте деталь–деталь на основе учета динамики изменения активного R_K и индуктивного X_K сопротивлений вторичного контура контактной машины, а также параметров λ и $\cos\varphi$ (коэффициент мощности $\cos\varphi$) [74, 77–83].

Все системы, создаваемые для возможности активного или пассивного воздействия на процессы КРС и КТС, можно разделить на следующие группы [75, 76].

- 1 Обеспечивающие жесткое управление процессом сварки. В таких системах основные параметры режима, задаваемые оператором на регуляторе цикла сварки контактной машины, в случае возникшей необходимости можно изменить только вручную и после остановки технологического процесса. Это существенно снижает производительность труда, причем до момента корректировки режимов значительная часть партии сварных узлов может оказаться бракованной из-за несвоевременности внесения изменений в технологию.

- 2 Обеспечивающие автоматическую компенсацию величин параметров режима. В таких системах необходимо наличие устройств, учитывающих влияние отдельных возмущающих воздействий на процесс сварки. Нелинейность регулировочных характеристик контактных машин не позволяет вводить в их состав подобные устройства достаточно высокой точности даже при



использовании аналого-цифровых или цифроаналоговых вычислительных средств (существенно усложняющих систему управления в целом).

3 Обеспечивающие автоматическое регулирование параметров режима. Они функционируют по принципу обратной связи, когда, независимо от влияния возмущающих воздействий, параметры режима сварки поддерживаются на определенном уровне. При этом наличие в них исполнительных элементов в виде силовых тиристорov придает дополнительную инерционность процессу управления в целом.

4 Обеспечивающие автоматическую компенсацию величин параметров режима с одновременным поддержанием регулируемой величины на постоянном уровне за счет обратной связи. К ним относятся устройства, позволяющие воздействовать на регулятор цикла сварки контактной машины в режиме реального времени (непосредственно в процессе сварки), игнорируя его первоначальные настройки. Такие системы весьма сложны конструктивно, индивидуальны для разных регуляторов цикла сварки, и к ним предъявляются повышенные требования по быстродействию срабатывания.

Известно семь групп систем, создаваемых с целью автоматической регулировки основных или вспомогательных параметров режима КРС и КТС [74, 75, 84].

1 Регуляторы вспомогательного параметра $I_{CB}^n \tau_{CB}$. В них регулировка длительности протекания импульса тока τ_{CB} происходит в зависимости от его величины I_{CB} , предварительно установленной для различных диаметров ядра. При этом практика показала, что при попытках поддержания значения такого параметра на постоянном уровне наблюдается «недокомпенсация», а именно: происходит недостаточное увеличение параметра τ_{CB} при уменьшении параметра I_{CB} .

2 Регуляторы вспомогательного параметра $I_{CB}^2 \tau_{CB}$. В них наблюдается противоположная ситуация: параметр τ_{CB} возрастает недопустимо, увеличивая теплоотвод и снижая производительность процесса сварки. Это также приводит к увеличению в сварном соединении размеров ЗТВ. Кроме того, такие регуляторы не учитывают изменение площадей контактов электрод–деталь в процессе сварки, параметра F_{CB} , степени шунтирования тока и др. Регуляторы цикла сварки типа РВИ-801 и их аналоги (устройство активного контроля УАК-02 и др.) работают именно по такому принципу.

3 Регуляторы параметра I_{CB} (основного). Такие регуляторы предназначены для стабилизации тока на определенном уровне [85–91]. В процессе сварки значение параметра I_{CB} фиксируется датчиком (например, поясом Роговского или датчиком на эффекте Холла). В случае понижения или повышения значения параметра I_{CB} положительный или отрицательный сигнал управления соответственно воздействует на фазорегулирующее устройство прерывателя, после

чего угол включения тиристоров α корректируется. В конечном счете это обеспечивает автоматическое поддержание значения параметра I_{CB} на заданном уровне. Регуляторы типа РТС-1 работают именно по такому принципу. Их преимущества перед регуляторами первых двух групп очевидны: учитываются и компенсируются колебания напряжения питающей сети, изменения в характеристиках контура сварочной машины и отклонения значения сопротивления межэлектродной зоны. Однако быстроедействие их срабатывания может достигать до 2,5 периодов сетевого напряжения, и они изначально разрабатываются под конкретные программы изменения параметра I_{CB} . Влияния шунтирования тока, изменения площадей контактов электрод–деталь и параметра F_{CB} на ход процесса сварки такие регуляторы также не учитывают.

4 Регуляторы вспомогательного параметра $U_{ЭЭ}$ [92–100]. Такие регуляторы функционируют по принципу поддержания величины напряжения межэлектродной зоны $U_{ЭЭ}$ на определенном уровне. Это позволяет обеспечивать выделение в межэлектродной зоне постоянной мощности $P_{ЭЭ}$, которая не зависит ни от диаметра электрода, ни от параметра F_{CB} . Главный недостаток таких регуляторов – необходимость максимального приближения точки замера $U_{ЭЭ}$ к рабочей поверхности сварочных электродов.

5 Регуляторы вспомогательного параметра $R_{ЭЭ}$ [101–104]. Принцип работы таких регуляторов построен на определении мгновенных значений сопротивления межэлектродной зоны $R_{ЭЭ}$ (по закону Ома) путем регистрации и обработки синусоидальных сигналов $U_{ЭЭ}$ и I_{CB} . Значения кривой $R_{ЭЭ}$ поступают в блок управления, который по алгоритму программатора воздействует на угол открытия тиристоров α . Следует отметить, что при сварке ферромагнетиков только активная составляющая параметра $R_{ЭЭ}$ может использоваться в расчетах, а процесс измерения параметра $U_{ЭЭ}$ затруднителен из-за помех от воздействия электромагнитного поля зоны вторичного контура контактной машины на провода регистрирующей аппаратуры и датчиков. При этом измерять $U_{ЭЭ}$ возможно лишь на определенном удалении от контактов электрод–деталь, что не позволяет исключить из расчетов имеющееся падение напряжения в этой зоне.

6 Регуляторы вспомогательного параметра $h_{ЭЭ}$ [105–111]. Принцип их работы состоит в том, что в памяти контроллера имеется некая идеальная кривая перемещения подвижного электрода $h_{ЭЭ}$, которую необходимо поддерживать путем регулировки параметров I_{CB} и F_{CB} на протяжении всего процесса сварки. Также имеется возможность отключения тока в момент достижения параметром $h_{ЭЭ}$ заданного значения, хранящегося в памяти контроллера. Необходимо отметить, что данные регуляторы применимы лишь в идеальных условиях сварки, когда возникновение выплесков расплавленного металла из межэлектродной зоны исключено (т. к. это повлияло бы на превышение параметра $h_{ЭЭ}$ относительно установленного предела). При этом возможные

прогибы консоли, на которой крепится неподвижный электрод, существенно снижают точность измерения параметра $h_{\text{эз}}$ и процесс регулирования в целом.

7 Регуляторы комплексных вспомогательных параметров (мощности $P_{\text{эз}}$ или энергии $Q_{\text{эз}}$ межэлектродной зоны). В [76] приведена единственная попытка создания такого регулятора. Отключение тока происходило посредством электронного прерывателя в момент достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону, заданного значения $Q_{\text{эз}}$. Авторы идеи первоначально считали, что такой регулятор позволит поддерживать значения параметров $P_{\text{эз}}$ или $Q_{\text{эз}}$ на заданном уровне вне зависимости от влияния на межэлектродную зону возмущающих воздействий. Однако при экспериментах выяснилось, что для этого в состав регулятора должен входить нелинейный элемент (а именно – множительное устройство), которого на тот момент еще не было разработано.

В конечном счете можно сделать вывод о том, что все известные системы воздействия на аппаратуру управления сварочных контактных машин, а также регуляторы отдельных параметров режима сварки (основных или вспомогательных) имеют следующие общие недостатки:

- отсутствие единого обобщающего параметра, по которому можно было бы с достаточной точностью оценить процесс ввода энергии в межэлектродную зону в условиях влияния на нее возмущающих воздействий;
- невозможность отслеживания величины энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, и сравнения этой величины с расчетным значением в соответствии с уравнением теплового баланса для возможности управления процессом сварки;
- недокомпенсация или чрезмерная компенсация при автоматическом регулировании электрических параметров режима сварки;
- невозможность учета потерь мощности в межэлектродной зоне при шунтировании линий протекания сварочного тока через близлежащие сварные точки;
- недостаточное быстродействие срабатывания аппаратуры управления сварочной контактной машины от сигналов со стороны внешних устройств.

Качество рельефных и точечных сварных соединений, а также стабильность их прочностных характеристик зависит прежде всего от заданного и фактического режимов сварки. Непосредственно в ходе сварки на межэлектродную зону неизбежно оказывают влияние возмущающие воздействия, фактически отклоняющие режимы сварки от заранее заданных на контактной машине (например, такие воздействия, как колебания напряжения питающей сети или разная степень подготовки поверхностей свариваемых деталей). Поэтому и появилась необходимость оптимизации основных параметров режима КРС/КТС.

Простейшей методикой оптимизации параметров режима КРС/КТС является методика по допустимым отклонениям, например, параметров $I_{\text{св}}$

или $U_{\Sigma\Sigma}$ [112]. Алгоритмы, построенные на общих принципах нечеткой логики, лежат в основе такой методики.

Методики оценки диаметра литого ядра сварной точки по регрессионным моделям являются более сложными и используются для изучения качества большого количества однотипных сварных соединений. Такие модели обычно представляются в виде формул, которые выводятся через расчеты полиномов первого или второго порядков, а исходные данные для таких расчетов получают посредством серии экспериментальных сварок однотипных образцов с последующей обработкой методами математической статистики [112].

Методики оптимизации параметров режима КРС/КТС по математическим нейросетевым моделям являются на данный момент наиболее сложными. При этом они позволяют повысить точность и надежность прогнозирования качества сварки за счет возможности анализа параметров I_{CB} , $U_{\Sigma\Sigma}$, $R_{\Sigma\Sigma}$ в динамике [113, 114].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона для контроля процессов контактной сварки развитие получили статистические модели (разновидность математических). Они основываются на расчете специальных статистических коэффициентов. Главный их недостаток – необходимость пересчета коэффициентов в случаях рассмотрения новых материалов или толщин свариваемых деталей, отличных от первоначально рассчитанных (этот процесс представляет собой весьма трудоемкую операцию) [75].

В литературе по сварке давлением приводятся многочисленные способы регулирования отдельных параметров режима контактной сварки, однако рассматриваются они, как правило, применительно к процессу контактной точечной сварки как наиболее исследованному и распространенному. Процессы КРС и КШС, более сложные в изучении, многими учеными рассматриваются именно как разновидности КТС. Более того, методику расчета основных параметров режима КТС на основе уравнения теплового баланса многие авторы предлагают использовать и для КРС, что некорректно, т. к. кинетика формирования соединений для этих двух способов сварки принципиально отличается. При этом является очевидным, что взаимосвязи между тремя основными параметрами режима КТС, такими как величина и длительность протекания импульса тока, а также усилие сжатия электродов, являются основополагающими при разработке способов регулирования параметров режима процесса КРС.

Например, в [115] на участке нарастания синусоидального сигнала I_{CB} с помощью специального датчика-энкодера измеряют параметр $h_{\Sigma\Sigma}$ (перемещение верхнего подвижного электрода). Дальнейшее интегрирование $h_{\Sigma\Sigma}$ приводит к получению параметра X_{KON} (контролируемого параметра), значение которого сравнивается с неким заданным $X_{зад1}$. Как только параметр X_{KON} достигает значения $X_{зад1}$, соответствующего началу плавления металла в

контакте деталь–деталь (условие 1), увеличение I_{CB} прекращается и далее его величина не изменяется до конца процесса сварки. Далее, когда параметр X_{KON} достигает значения $X_{ЗД2}$, соответствующего требуемому диаметру ядра точки, происходит выключение I_{CB} (рисунок 2.5).

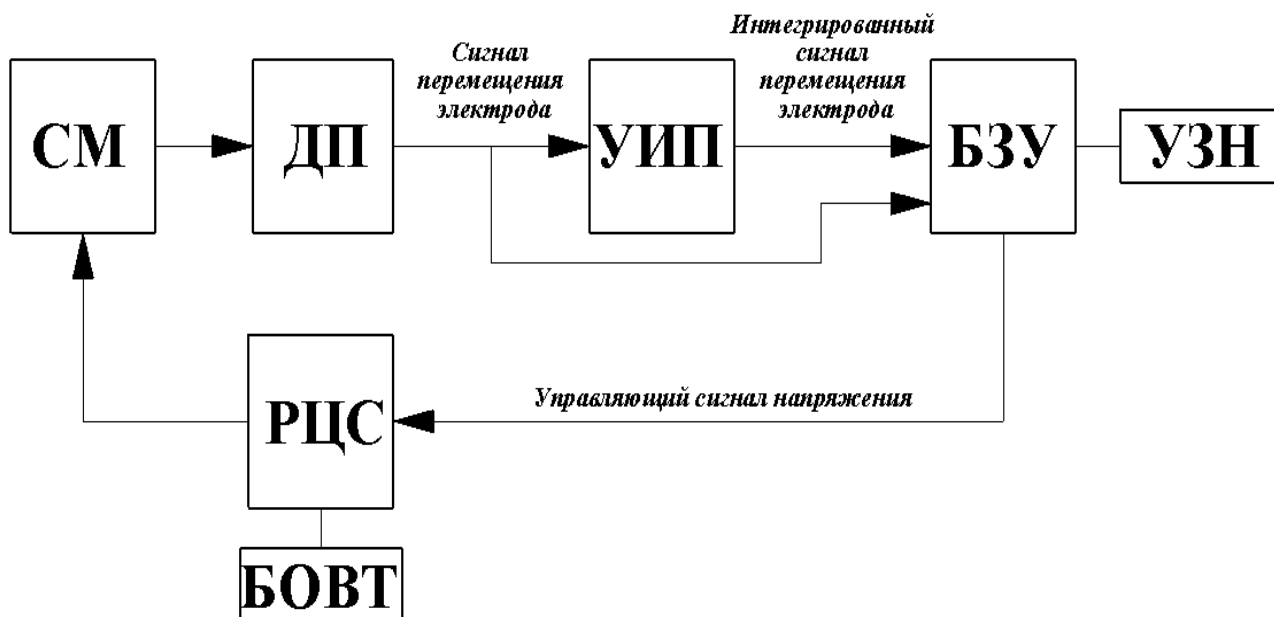


Рисунок 2.5 – Схематичный вид способа регулирования тока при КРС/КТС посредством регистрации перемещения подвижного электрода

На рисунке 2.5: СМ – сварочная машина; ДП – датчик перемещения электрода; УИП – устройство интегрирования сигнала перемещения; БЗУ – блок задания условия начала плавления металла в контакте; УЗН – устройство задания нормированных значений перемещения, интеграла от перемещения, времени сварки; РЦС – регулятор цикла сварки; БОВТ – блок ограничения времени нарастания сварочного тока.

Уменьшение толщины каждой из свариваемых деталей затрудняет замер параметра $h_{ЭЭ}$, т. к. при малой его величине становится сложнее анализировать динамику изменения данного параметра. По этой причине для расчета контролируемого параметра X_{KON} в процессе сварки более рационально измерять:

- линейную скорость перемещения подвижного электрода $v_{Э}$ (сварка среднетолщинного металла);
- линейное ускорение $a_{Э}$ подвижного электрода (сварка тонколистового металла).

В [116] производят независимое измерение параметра I_{CB} датчиками тока на каждой паре сварочных электродов многоэлектродной машины. Способ позволяет применить индивидуальный режим сварки и подрегулировку I_{CB} для каждой точки (рисунок 2.6).

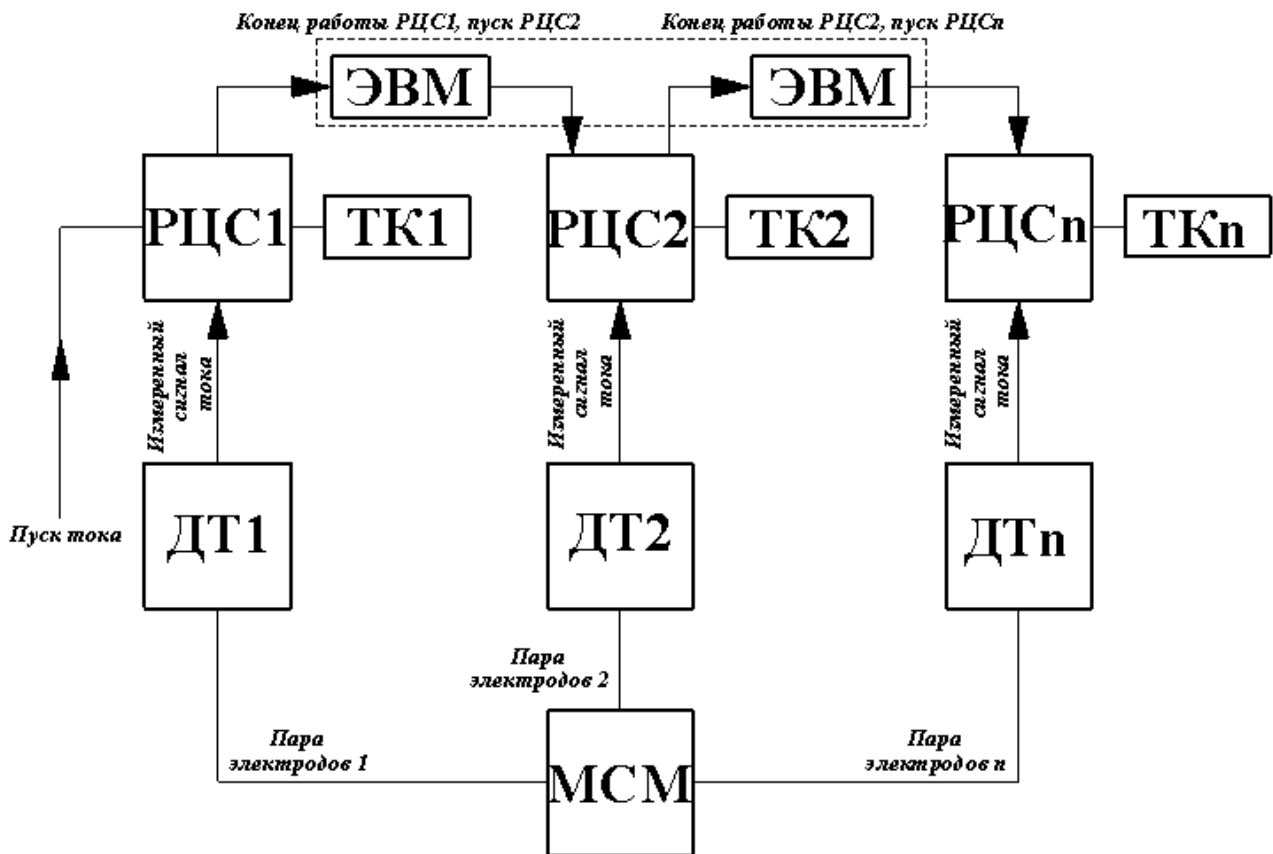


Рисунок 2.6 – Схематичный вид способа регулирования тока при КРС/КТС посредством его обычной регистрации датчиками и индивидуальной корректировки угла открытия тиристоров в паузах между циклами

На рисунке 2.6: МСМ – многоэлектродная сварочная машина; $ДТ_1...ДТ_n$ – датчики тока; $РЦС_1...РЦС_n$ – регуляторы цикла сварки; $ТК_1...ТК_n$ – тиристорные контакторы; ЭВМ – компьютер.

Большое число датчиков, регуляторов, контакторов и масса проводов, а также пассивный характер регулировки параметра I_{CB} (для этого процесс сварки необходимо прерывать) в совокупности делает данный способ регулирования тока не всегда целесообразным на производстве.

В [117] используется многофункциональный измеритель параметров КТС. Он позволяет измерять параметры F_{CB} , I_{CB} и τ_{CB} в диапазонах 1...20 кН (погрешность $\pm 5\%$), 2...250 кА (погрешность $\pm 2,5\%$) и 1...2000 мс соответственно. Главный его недостаток – неспособность внесения изменений в режим сварки и лишь сигнализация об отклонении параметров F_{CB} , I_{CB} и τ_{CB} от заданных значений.

В [118] после предварительного сжатия электродов (посредством подачи сигнала с внешнего программного блока на ЭВМ) через межэлектродную зону в течение 5...10 полупериодов пропускают стабилизирующий ток $I_{СТАБ}$ величиной 0,2...1 кА для предварительной оценки площади сечения контакта деталь–деталь

(конкретной площади сечения $S_{сечn}$ соответствует определенное падение напряжения ΔU_n) (рисунок 2.7).

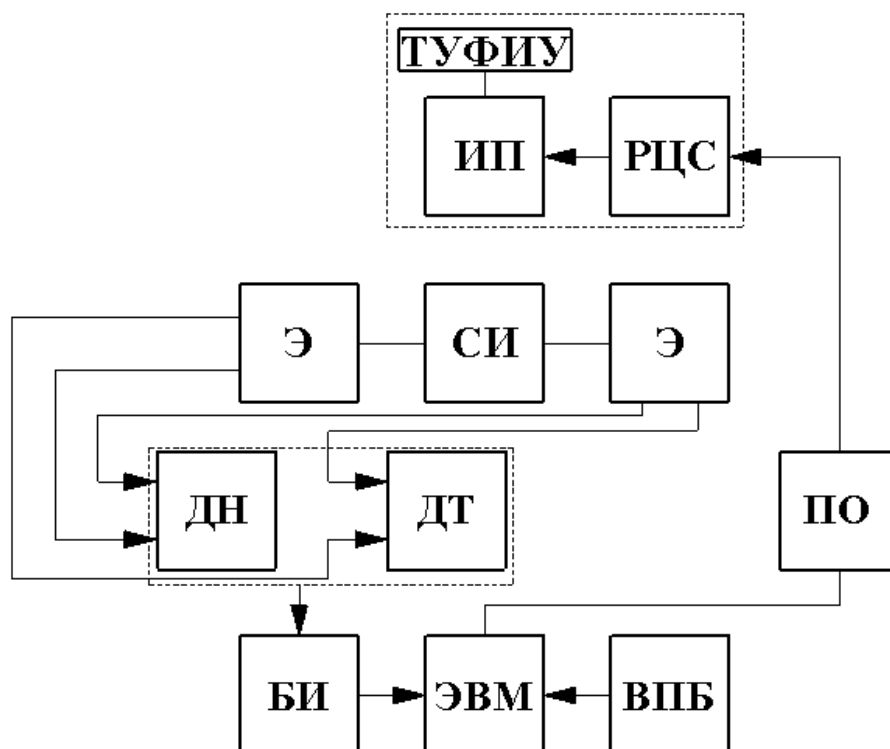


Рисунок 2.7 – Схематичный вид способа регулирования тока при КРС/КТС посредством корректировки угла открытия тиристорov командами ЭВМ

На рисунке 2.7: СИ – свариваемое изделие; Э – электрод; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; БИ – блок измерения; ЭВМ – микрокомпьютер; ВПБ – внешний программный блок; ПО – пульт оператора; РЦС – регулятор цикла сварки; ИП – источник питания; ТУФИУ – тиристорное устройство с фазоимпульсным управлением.

Фактическая величина падения напряжения между электродами ΔU_n используется как информация для ЭВМ, которая генерирует (команда «ПУСК») или не генерирует (команда «СТОП») сигнал на включение тока. В случае генерации такого сигнала блок измерения фиксирует значения параметров $I_{св}$ и $U_{ээ}$ (действующие) в конце каждого полупериода сетевого напряжения. По величине отклонения фактического значения $I_{св}$ от заданного $I_{зад}$ на ЭВМ происходит расчет угла открытия тиристорov α с последующей выработкой управляющих импульсов для его корректировки на сварочной машине. Завершается управление процессом сварки автоматическим вычислением на ЭВМ суммарной (за весь процесс) интегральной ошибки стабилизации параметра $I_{св}$. При этом качество формируемых сварных соединений можно оценить путем сравнения вычисленных величин с допустимыми значениями. Если со стороны ЭВМ поступает информация о недостаточном качестве сварного соединения, то осуществляется корректировка параметров режима с

приостановлением всего технологического процесса сварки. Корректировке могут подлежать такие параметры режима, как величина и длительность протекания импульса тока, а также усилие сжатия электродов. Иногда может производиться замена электродов.

Недостатком способа является необходимость остановки процесса в случае изменения параметров I_{CB} и τ_{CB} , что снижает его производительность.

В [119] для возможности управления процессом КРС/КТС предлагается перед началом сварки определять активное и индуктивное сопротивления вторичного контура сварочной машины (R_K и X_K) в режиме короткого замыкания электродов. Для этого предварительно осуществляется несколько последовательных включений трансформатора (с определенными углами включения тиристоров $\alpha_1 \dots \alpha_n$). Для каждого из этих включений датчиком измеряют (и фиксируют в табличном виде) действующие значения тока $I_{2ИЗМ1} \dots I_{2ИЗМn}$ во вторичной цепи, после чего строят графики функций $X_K = f(R_K)$ (кривые 1–4 на рисунке 2.8). Точки пересечения графиков, а именно их координаты, фактически соответствуют значениям R_K и X_K . Непосредственно в процессе сварки угол открытия тиристоров α изменяют так, чтобы среднее действующее значение тока I_2 , рассчитанное с учетом R_K и X_K , соответствовало заданному.

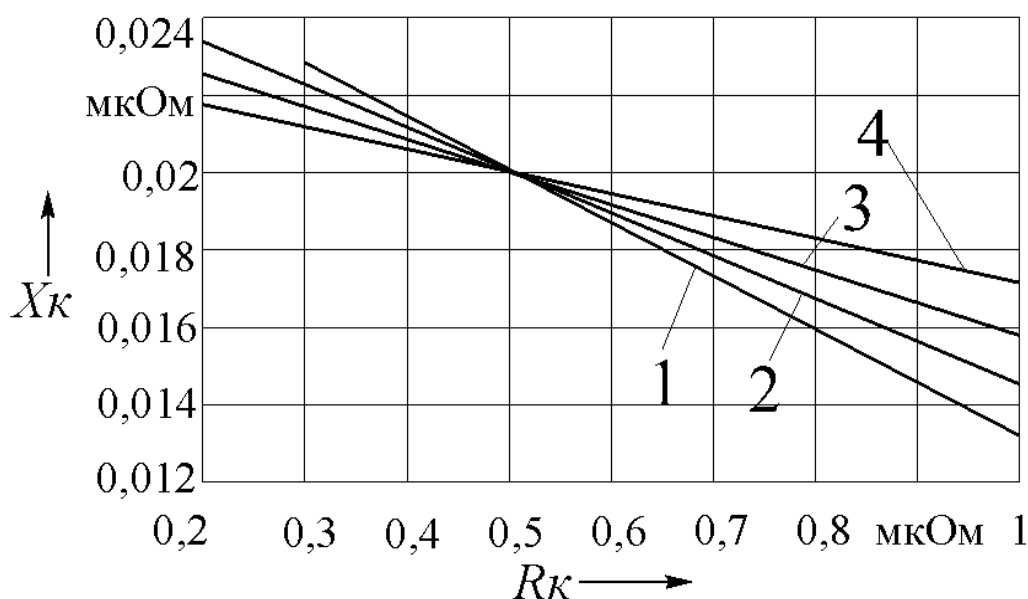


Рисунок 2.8 – Принцип регулирования тока при КРС/КТС посредством связи с полным сопротивлением контура контактной сварочной машины

Следует отметить, что величины активного и индуктивного сопротивлений вторичного контура сварочной контактной машины существенно зависят от массивности свариваемых деталей (если они изготовлены из ферромагнитного материала), а также от их расположения относительно сварочных электродов (особенно важно для массивных неосесимметричных деталей). Сопротивления

переходных контактов при большом количестве циклов сварки также могут меняться, что параметром R_K не учитывается. Эти недостатки ограничивают применение данного способа управления процессом КРС/КТС на практике.

В [120] при КРС/КТС производится справочное измерение тепловыделения в межэлектродной зоне в каждом периоде по формуле $q_n = 0,02 I_{CB}^2 R_{ЭЭ}$ посредством регистрации параметров I_{CB} и $U_{ЭЭ}$ при заданном угле открытия тиристоров α , а также при известных параметрах R_K , X_K и длительности включенного состояния тиристоров λ . Для этого при сварке датчик тока измеряет мгновенные значения параметра I_{CB} , а блок измерения тока преобразует их в действующие. Это происходит одновременно с регистрацией (блоком синхронизации) синусоидального напряжения со вторичной обмотки сварочного трансформатора. Этот блок вырабатывает импульсы, своей полярностью (положительной) совпадающие с положительной полярностью сетевого напряжения, а фронты этих импульсов (передний и задний) совпадают с переходом сетевого напряжения через ноль. Дополнительно происходит формирование импульсов положительной полярности блоком включения тиристоров, причем эти импульсы совпадают с моментом включенного состояния тиристоров, т. е. фронты этих импульсов (передний и задний) совпадают с моментами начала и окончания импульсов сварочного тока. При сварке все вышеуказанные импульсы положительной полярности совместно подаются на входы осциллографа, и это дает возможность получать диаграммы перехода сетевого напряжения через ноль и включения тиристоров. В конечном счете данные диаграммы используются для определения параметров α и λ в каждом периоде сетевого напряжения.

Кроме того, в [120] представлены:

- система стабилизации вторичного тока для КТС/КРС (она определяет степень износа сварочных электродов и взамен предварительно заданного значения тока задает новое для выполнения условия $Q_M + Q_{CB} = \text{const}$ (Q_M – теплота, расходуемая на теплоотвод в прилегающий основной металл деталей; Q_{CB} – теплота, расходуемая на формирование сварного соединения));
- компьютеризированная установка для изучения процессов КТС/КРС и управления ими, позволяющая регулировать действующее значение параметра I_{CB} для каждого периода сетевого напряжения отдельно.

Установка включает персональный компьютер, блок цифрового ввода-вывода Е-440 (ЗАО «Л-Кард») и блок согласования. Изначально в программу на ЭВМ вносятся исходные значения параметров режима для соответствующих каналов (импульсы синхронизации для перехода сетевого напряжения через ноль, длительность включения электропневмоклапанов, параметр λ). После этого осуществляется задание параметра α в градусах для каждого последующего периода сетевого напряжения. Если в процессе сварки $\alpha = 180^\circ$ на некоторых периодах, то включения тиристоров на них не происходит. Если же





На рисунке 2.9: СТ – сварочный трансформатор; ВТ – вспомогательный трансформатор; КЭ1, КЭ2 – управляющие катушки электропневмоклапанов; БП – блок поджига тиристоров; КК1, КК2 – коммутации катушек управления; ТУР – блок формирования импульсов запуска тиристоров; БС – блок согласования; П – питание; К1...К4 – каналы задачи параметров цикла; ЭВМ – компьютер; РЦС – регулятор цикла сварки; БВВ – блок ввода-вывода.

В [121] описывается виртуальная технология для контактной сварки. По своей сущности, это экспертная программа для ЭВМ, представляющая собой своеобразную базу данных. В зависимости от материала свариваемых деталей она дает возможность выбирать основные параметры режима сварки, тип

контактной машины, а также критерии оценки качества сварных соединений. Оценка качества соединений производится по математическим моделям. После окончания процесса сварки экспертная программа выдает в печатном виде карту технологии получения конкретного изделия. Указанная технология была реализована в виде прибора КСУ КС-02. Прибор предназначен для контроля процесса сварки на стационарных, а также подвесных машинах переменного тока [112] (рисунок 2.10).

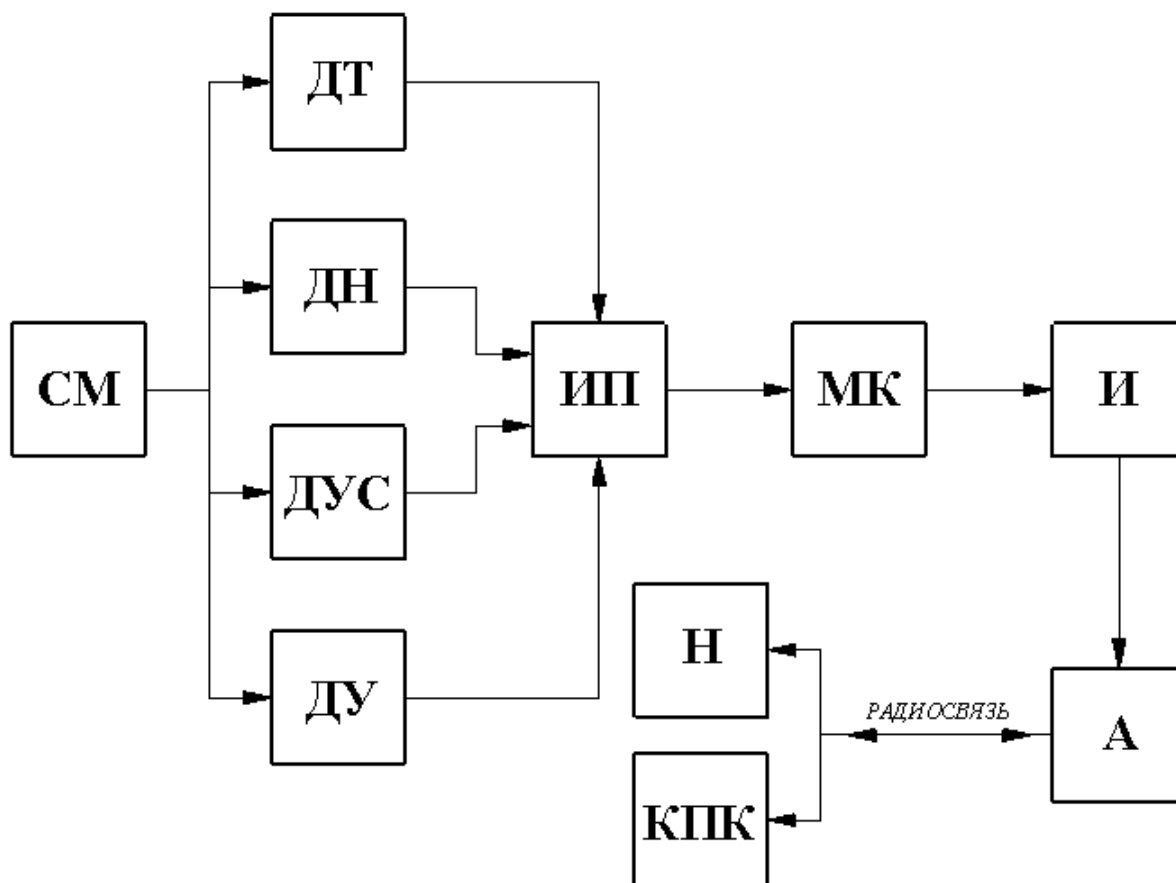


Рисунок 2.10 – Схематичный вид системы КСУ КС-02

На рисунке 2.10: СМ – сварочная машина; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; ДУС – датчик усилия сжатия электродов; ДУ – датчик ускорения подвижного электрода; ИП – измерительный преобразователь; МК – микроконтроллер; И – интерфейс; А – адаптер Bluetooth; Н – ноутбук; КПК – карманный персональный компьютер.

В системе КСУ КС-02 изначально в микроконтроллер заносятся оптимальные значения параметров $I_{св}$ и $U_{ээ}$, а также диапазон их допустимых отклонений ΔI и ΔU в процентах. При сварке датчиками регистрируются фактические значения данных параметров и системой формируется сигнал о выходе из допусков по любому из них. Одновременно по величине $U_{ээ}$ контролируется диаметр контакта электрод–деталь, по которому определяется необходимость корректировки тока для нормализации его плотности.

Основная задача системы КСУ КС-02 сводится к расчету уравнения регрессии после анализа графика изменения сопротивления межэлектродной зоны R_{Σ} и его взаимосвязи с прочностными показателями сварных соединений (для сварки деталей с покрытиями). Для эффективного решения данной задачи также предусмотрен алгоритм адаптации (подстройки) коэффициентов уравнения регрессии к экспериментальным данным на базе задания его входных параметров в относительных единицах по отношению к их оптимальным значениям (для сварки разнотолщинных деталей).

На базе прибора КСУ КС-02 разработана система КСУ КС-03 (для контроля процесса КТС), которая является портативной и включает в себя сварочную машину, датчик тока в виде пояса Роговского (производитель – Институт электросварки им. Е. О. Патона), измерительный преобразователь для датчика тока, датчик усилия сжатия MEGATRON KMB 31K 10 KN 0000D, измерительный преобразователь MEGATRON IMA 3-DMS-2405, датчик ускорения ANALOG DEVICE ADXL 103, портативное аналого-цифровое устройство сбора данных C8051F020 «Silicon Laboratory», интерфейс SP232с, адаптер Bluetooth btd 433, планшетный персональный компьютер, смартфон, коммуникатор, нетбук или ноутбук [112, 122, 123].

Принцип работы данной системы состоит в следующем. Сигналы процесса сварки регистрируются датчиками в режиме реального времени, далее поступают на соответствующие измерительные преобразователи, после чего воспринимаются аналого-цифровым устройством сбора данных и визуализируются на экране ЭВМ (поступают туда через интерфейс). В это же время контролирующий блок с заданной периодичностью (0,01 с) вырабатывает проинтегрированные значения параметров I_{CB} , U_{Σ} , F_{CB} и a_{Σ} . По этим значениям ЭВМ производит расчет таких входных параметров контроля, как I_{CB} , U_{Σ} , h_{Σ} и R_{Σ} за последний период процесса сварки, относительное изменение R_{Σ} , отклонения фактических кривых изменения параметров I_{CB} , U_{Σ} , h_{Σ} от изначально заданных (интегральные оценки), энергия, которая выделилась в контакте деталь–деталь, средние значения параметров I_{CB} и U_{Σ} за всю длительность протекания импульса тока (на каждой четверти данного временного отрезка). После этого система алгоритмически производит сравнение фактических параметров контроля с заданными. В табличном виде эти сведения отображаются на мониторе ЭВМ и сохраняются.

Обобщая вышеприведенную информацию, можно заключить, что с помощью систем КСУ КС-02 и КСУ КС-03 можно осуществлять статистический анализ процесса сварки, на основании чего производить последующую пассивную корректировку основных параметров режима. Произвести в реальном времени регулируемый поэтапный ввод энергии в межэлектродную зону в условиях влияния на нее возмущающих воздействий данные системы не способны.

2.3 Разработка способа КРС с поэтапным дозированным вводом энергии в межэлектродную зону

С целью устранения недостатков известных систем внешнего воздействия на основные параметры режима контактной рельефной сварки был предложен и запатентован принципиально новый способ КРС [124]. Основная идея способа состоит в возможности регулируемого поэтапного дозированного ввода энергии в межэлектродную зону путем задания многоступенчатого импульса тока. Предполагалось, что данная технология позволит существенно снизить возможность возникновения начальных и конечных выплесков расплавленного металла из межэлектродной зоны при КРС, что уменьшит дефектность формируемых соединений, в том числе и в случаях влияния на процесс сварки различных возмущающих воздействий.

Сущность предложенного способа КРС можно описать последовательностью действий (рисунок 2.11).

1 Произвести установку свариваемых деталей в пространстве межэлектродной зоны контактной машины.

2 Сжать свариваемые детали электродами, причем усилие сжатия электродов F_{CB} необходимо сохранять постоянным на протяжении всего процесса сварки.

3 Пропустить через свариваемые детали многоступенчатый импульс тока величиной I_{CB} и длительностью протекания τ_{CB} таким образом, чтобы фактическое значение параметра τ_{CB} определилось по формуле $\tau_{CB} = \tau_{CB\Phi 1} + \tau_{CB\Phi 2} + \dots + \tau_{CB\Phi n}$, где $\tau_{CB\Phi 1}, \tau_{CB\Phi 2}, \dots, \tau_{CB\Phi n}$ – фактические длительности протекания тока на каждой из ступеней его задания для соответствующих его значений $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$. При этом каждое фактическое значение параметра τ_{CB} должно определяться (например, автоматически) фактическим достижением суммарной энергией $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, требуемого значения $Q_{ЭЭ} = Q_{TP1} + Q_{TP2} + \dots + Q_{TPn}$, где $Q_{TP1}, Q_{TP2}, \dots, Q_{TPn}$ – требуемые значения вводимой в межэлектродную зону энергии для значений тока $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$ на каждой из ступеней его импульса.

4 Выключить ток и произвести проковку сварного соединения усилием F_{CB} или повышенным ковочным усилием $F_{КОВ}$ в течение заданного времени $\tau_{КОВ}$.

5 Развести электроды контактной машины.

Задание тока в виде многоступенчатого импульса посредством какой-либо системы управления, а также реализация процесса отслеживания этой системой моментов достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону на различных этапах кинетики формирования соединения, заданных значений, в совокупности дает возможность плавной регулировки скорости деформации рельефов на каждом из таких этапов.



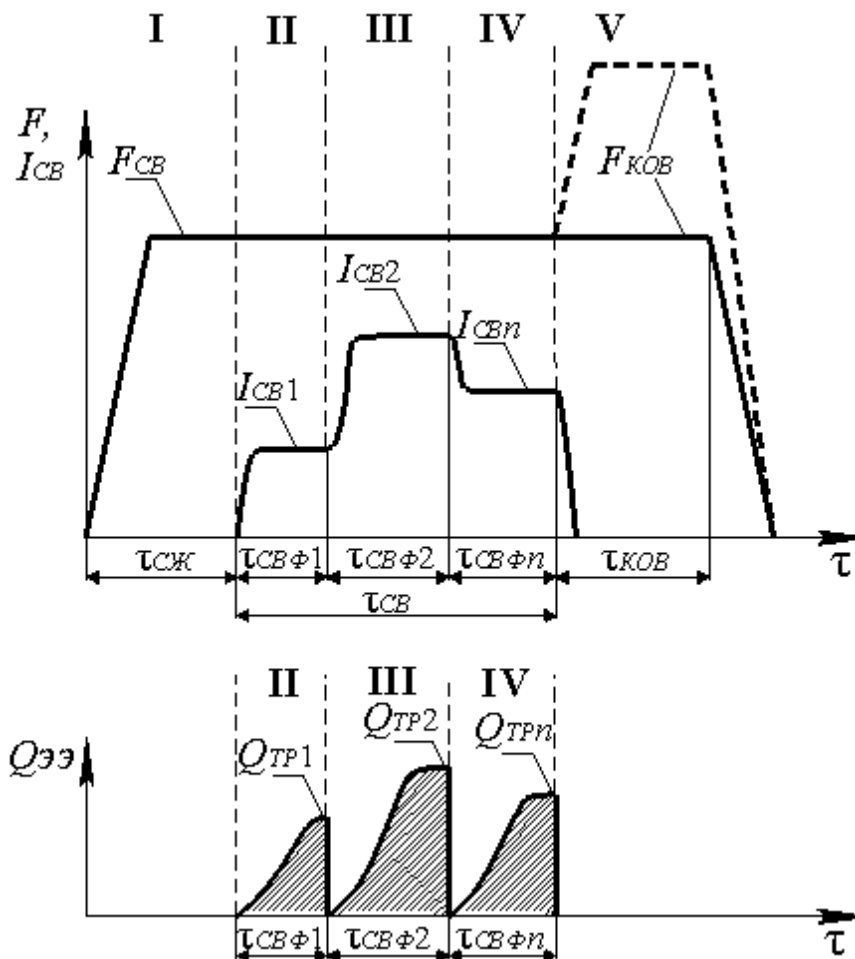


Рисунок 2.11 – Предложенный способ КРС

При этом контактная машина осуществляет своевременное выключение тока в точном соответствии с заданным значением энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону. Это, в свою очередь, обеспечивается возможностью определения фактического значения параметра $\tau_{\text{СВ}}$ на отдельных ступенях импульса тока, т. к. требуемое значение суммарной энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, вводимой в межэлектродную зону, задается как сумма требуемых значений энергии для каждой из ступеней импульса.

Таким образом, предложенная технология КРС позволяет, во-первых, придать термодформационным процессам межэлектродной зоны предсказуемый характер, во-вторых, своевременно выключать ток на контактной машине, что в конечном счете уменьшает величину ее энергопотребления в каждом цикле сварки без ущерба прочности формируемых соединений.

Среди известных способов КРС/КТС, наиболее близких к предложенному по циклограммному принципу, следует выделить два.

Первый способ заключается в пропуске через свариваемые детали комбинированного импульса тока, первая часть которого выполняет функцию подогрева металла зоны сварки, а вторая – функцию основного импульса сварочного тока. Происходит это при приложении усилия сжатия к деталям со

стороны электродов [37]. Данный способ не обеспечивает точного введения в зону сварки требуемого количества тепла на всех основных этапах кинетики формирования соединения (во время протекания тока через детали), что связано с отсутствием обратной связи между регулятором цикла сварки и параметрами режима, подвергаемыми действию возмущающих воздействий. Непосредственно в ходе КРС это, в свою очередь, приводит к дестабилизации процесса введения энергии в межэлектродную зону, который зависит от кинетики деформирования рельефов, что ведет к начальным и конечным выплескам расплавленного металла из межэлектродной зоны.

Второй способ описывается следующей последовательностью действий.

- 1 Разместить свариваемые детали в межэлектродной зоне.
- 2 Предварительно сжать свариваемые детали в холодном состоянии посредством электродов перед включением импульса тока, причем величину параметра F_{CB} не изменять на протяжении всего процесса сварки.
- 3 Пропустить через свариваемые детали (сжатые) комбинированный импульс тока длительностью протекания τ_{CB} .
- 4 Выключить ток и выдержать детали в сжатом состоянии на протяжении заданного времени после его выключения (проковка) [125].

Особенностью действия 3 является то, что импульс тока является комбинированным и включает следующие ступени:

- первая ступень с током электрического пробоя слоя окалины на деталях;
- вторая ступень с током подогрева;
- третья ступень с основным током (расчетным, сварочным).

Недостатком данного способа является необходимость использования специализированных контактных машин значительных мощностей (1...1,5 МВт), которые могут обеспечивать вторичные токи как нормальной частоты (для пробоя слоя окалины на деталях), так и низкочастотные (для подогрева и сварки). Такие машины характеризуются высокой стоимостью, причем в случае поломок их ремонт весьма затруднителен. Указанный способ почти не применим для сварки листового металла небольших толщин (до 6 мм) и, как и первый способ, не позволяет осуществлять регулируемый поэтапный ввод расчетной энергии (по УТБ) в межэлектродную зону.

2.4 Разработка системы автоматического управления процессом КРС

Для реализации предложенного способа КРС на практике была разработана и запатентована система автоматического управления данным процессом, отличная от известных. В основе данной системы лежат аналого-цифровое устройство сбора данных фирмы NATIONAL INSTRUMENTS (далее – устройство NI USB 6251) и среда LABVIEW на графическом языке программирования «G» (далее – среда LVW 2010) (производитель – США).



Общая концепция процесса разработки данной системы заключалась в возможности реализации взаимодействия в реальном времени регулятора цикла сварки сварочной контактной машины с неким внешним блоком управления по принципу обратной связи.

Предполагалось, что разрабатываемая система управления обеспечит стабилизацию процесса формирования литой зоны рельефного сварного соединения путем автоматического регулирования параметра τ_{CB} и задания многоступенчатой формы импульса тока независимо от начальных настроек регулятора цикла сварки в результате оптимизации величины энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, без остановки процесса КРС.

При разработке системы управления процессом КРС ставились следующие задачи:

- способность воздействовать на регулятор цикла сварки контактной машины в реальном времени с игнорированием его первоначальных настроек путем регистрации, обработки и анализа сигналов процесса КРС посредством датчиков тока и напряжения, а также устройства сбора и визуализации подобных данных;

- способность обеспечивать ввод в межэлектродную зону минимально возможного количества от расчетной величины энергии (по УТБ), но достаточного для обеспечения приемлемых прочностных характеристик рельефных сварных соединений;

- обладание быстродействием, достаточным для обеспечения управления процессом КРС в режиме реального времени с учетом собственного быстродействия регулятора цикла сварки контактной машины;

- в ходе процесса КРС способность учитывать задержку между моментами подачи управляющих сигналов от регулятора цикла сварки на электропневмоклапаны контактной машины и на тиристорные контакторы (для предварительного сжатия свариваемых деталей и последующего включения тока);

- недопущение запуска процесса КРС в случае ошибочной первоначальной настройки регулятора цикла сварки по такому основному параметру режима, как длительность протекания импульса тока (при чрезмерном его занижении – для предотвращения получения соединений с заведомо низкими прочностными показателями, при завышении – для предотвращения порчи заготовок от мощного выплеска расплавленного перегретого металла из межэлектродной зоны). В таких случаях система управления должна выводить сообщение «ОШИБКА» на свой монитор, а также блокировать позицию «НАЖАТИЕ ПЕДАЛИ» на регуляторе цикла сварки контактной машины;

- обеспечение максимально возможного комфорта работы оператора контактной машины без снижения производительности и качества его труда (обучение оператора для работы с такой системой управления должно быть минимальным по времени и несложным в восприятии);

– в случаях поломок возможность своевременных диагностики неполадок и ремонта узлов системы управления процессом КРС собственными силами предприятия (без обращения в специализированные фирмы за дополнительную оплату).

Автором монографии при проведении теоретических и экспериментальных исследований, связанных с повышением энергоэффективности процесса КРС, в качестве наиболее информативного комплексного входного параметра для разрабатываемой системы управления была выбрана величина энергии $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону.

Следует отметить, что при КРС по закону Джоуля-Ленца величина $Q_{ЭЭ}$ в большей степени определяется квадратом значения сварочного тока, являющегося основным параметром процесса и в значительной мере определяющего качество сварного соединения. По этой причине для КРС на переменном токе наибольшую связь с тепловой характеристикой процесса имеет именно действующий ток. Для синусоидальной формы сигнала, регистрируемого на осциллограмме, действующее значение тока рассчитывается автоматически согласно формуле $I = I_m / \sqrt{2}$ (I_m – амплитудное значение тока), а при фазовом регулировании действующий ток определяется численным интегрированием. Но значительно большую точность измерения при регистрации несинусоидального сварочного тока, а также при выделении его действующих значений можно получить с помощью ЭВМ и цифровых устройств.

Поэтому, как было указано выше, для регистрации сварочного тока и использовалось программируемое аналого-цифровое устройство сбора данных, в котором после приема мгновенных сигналов процесса КРС действующий ток рассчитывался следующим образом:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{CB}^2(t) dt}, \quad (2.1)$$

где i_{CB} – мгновенное значение тока;

T – период измерения сигнала.

Величина сварочного тока I_{CB} была выбрана в качестве первого входного параметра разрабатываемой системы управления процессом КРС, причем для соответствующих ступеней импульса тока предполагалась возможность вариативности его значений.

Величина расчетной энергии $Q_{ЭЭ}$, необходимой для ввода в межэлектродную зону, являлась вторым входным параметром (комплексным), причем предполагалась возможность отслеживания моментов достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону при КРС, заданных величин $Q_{ЭЭ}$ для соответствующих ступеней импульса тока.



Откорректированные значения длительности протекания тока τ_{CB} на отдельных ступенях его импульса были выбраны в качестве выходных параметров разрабатываемой системы управления процессом КРС.

В качестве инструмента для возможности задания многоступенчатого импульса тока и корректировки длительности его отдельных ступеней было выбрано устройство NI USB 6251, функционирующее посредством создаваемых пользователем программных кодов среды LVW 2010. Ожидалось, что это позволит воздействовать сигналами управления определенной величины со стороны аналоговых и цифровых выходов устройства NI USB 6251 на следующие позиции регулятора цикла сварки: «ЗАДЕРЖКА ЦИКЛА НА ПОЗИЦИИ «СЖАТИЕ»; «НАГРЕВ 1»; «НАГРЕВ 2»; «ОГРАНИЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА».

Для усиления маломощных сигналов управления, вырабатываемых устройством NI USB 6251 для последующего воздействия на входы регулятора цикла сварки, была запланирована разработка специального блока согласования сигналов. В его функции должны были войти не только усиление и регулирование мощности сигналов управления по каналам «устройство NI USB 6251 – регулятор цикла сварки», но и подключение устройства NI USB 6251 к регулятору цикла сварки через разъем, предназначенный для внешнего управления (регулятором).

На рисунке 2.12 представлена схема предложенной системы управления процессом КРС [126].

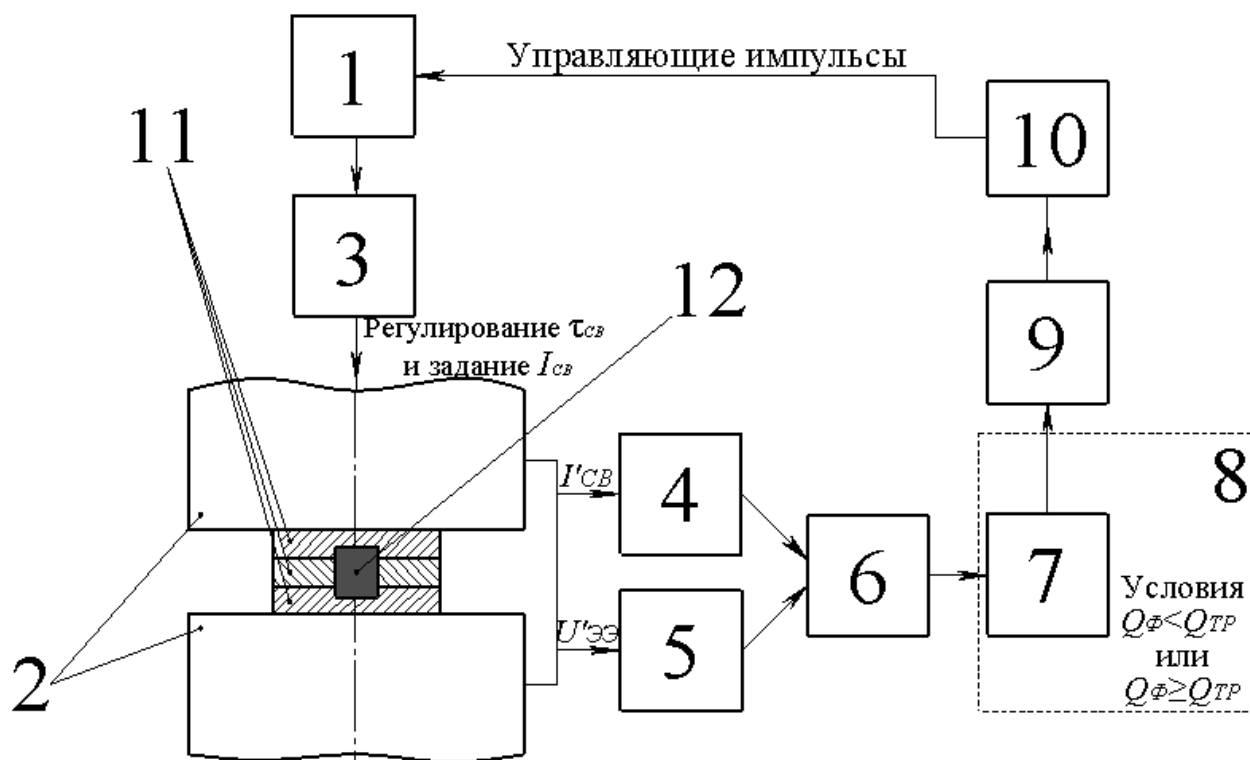


Рисунок 2.12 – Предложенная система автоматического управления процессом КРС

Принцип работы предложенной системы включает последовательность действий, происходящих непосредственно в процессе КРС.

1 На отдельных ступенях импульса тока устройство сбора данных 6 вырабатывает маломощные аналоговые сигналы управления, предназначенные для задания тока путем воздействия на позицию «НАГРЕВ» регулятора цикла сварки 1 и далее на блок поджига тиристоров 3. При этом маломощные сигналы управления, определяемые из экспериментально установленного диапазона, усиливаются путем прохождения через блок согласования 7 (на операционных усилителях), после чего следуют на регулятор цикла сварки посредством кабеля внешнего управления 8. Тем самым требуемый ток задается в диапазоне от минимально возможного, который определен отдельно для каждой ступени регулирования вторичного напряжения сварочного трансформатора, до максимального I_{CBmax} .

2 Устройство сбора данных 6 посредством датчика тока 4 и пары экранированных кабелей 5, установленных на электродах контактной машины 2, фиксирует мгновенные синусоидальные сигналы тока I'_{CB} и напряжения межэлектродной зоны U'_{Σ} с последующим расчетом величины энергии Q_{Σ} , фактически вводимой в межэлектродную зону на отдельных ступенях импульса тока.

3 Последовательно для каждой из ступеней импульса тока происходит сравнение величины энергии Q_{Σ} , фактически вводимой в межэлектродную зону, с заданным значением, заранее прописанным в программном коде среды LVW 2010 на устройстве NI USB 6251. При этом сумма значений параметра Q_{Σ} , задаваемых в программном коде среды LVW 2010 для соответствующих ступеней импульса тока, должна равняться величине энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону и рассчитанной по УТБ или иной методике (например, после оптимизации значения Q_{Σ} , полученного по УТБ).

4 После окончания последней ступени импульса тока (когда достигается заданное значение параметра Q_{Σ} за весь процесс КРС) электромагнитные реле блока согласования 7 подают на позицию «ОГРАНИЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА» регулятора цикла сварки 1 посредством кабеля управления 8 усиленные цифровые сигналы напряжения, которые поступают на блок поджига тиристоров 3 и обеспечивают выключение тока.

Таким образом, предложенная система управления процессом КРС обеспечивает автоматическую регулировку выходного параметра τ_{CB} при текущей корректировке первого входного параметра I_{CB} и отслеживании моментов достижения заданной величины вторым входным (комплексным) параметром Q_{Σ} на различных этапах кинетики формирования соединений (определяемых многоступенчатостью импульса тока). Это, в свою очередь, дает возможность более плавно уменьшать величину сопротивления межэлектродной зоны на протяжении всего процесса деформирования рельефа, что обеспечивает

получение литой зоны 10 требуемых размеров и формы без наличия дефектов от выплесков перегретого расплавленного металла (из межэлектродной зоны).

Следует отметить, что в блоке согласования предложенной системы управления именно электромагнитные реле и операционные усилители отвечают соответственно за выработку и усиление управляющих импульсов напряжения, поступающих на регулятор цикла сварки после задания их амплитуды и формы в программном коде среды LVW 2010.

В конечном счете в предложенной системе управления многоступенчатый импульс тока задается по амплитуде (на каждой из ступеней импульса) и ограничивается по времени на каждом из соответствующих этапов кинетики формирования рельефных соединений, что стабилизирует процесс введения энергии в межэлектродную зону и минимизирует возможность возникновения дефектов типа «выплеск», «непровар» или «пора».

Блок согласования включает две цепи [127].

1 Цепь регулирования аналоговых сигналов управления. В ее основе лежат два операционных усилителя. Основная функция цепи – регулировка величины импульсов напряжения, выбираемых из экспериментально определенного диапазона и в конечном счете задающих необходимую величину тока на соответствующих участках многоступенчатого импульса. Ток потребления для сигналов равен 15 мА. Питание цепи осуществляется за счет ее подключения к внешнему двухполярному источнику питания ± 12 В.

2 Цепь усиления цифровых сигналов управления. В ее основе лежат два электромагнитных реле и два транзистора. Основная функция цепи – включение/выключение тока от замыкания контактов реле. Питание цепи осуществляется за счет ее подключения к внешнему однополярному источнику питания + 5 В.

Блок согласования имеет следующую элементную базу (рисунок 2.13):

- два операционных усилителя КРУД708 (обозначение – ОУ1, ОУ2);
- один двухполярный источник питания для операционных усилителей (обозначение – $UG \pm 12В$);
- четыре постоянных резистора по 2 кОм (обозначение – 2 К);
- два переменных резистора по 100 кОм (обозначение – 100 К);
- два переменных резистора по 20 кОм (обозначение – 20 К);
- два электромагнитных реле NT732С (обозначение – К 1, К 2);
- один однополярный источник питания для электромагнитных реле (обозначение – $UG + 5В$);
- два постоянных резистора по 1,8 кОм (обозначение – 1,8 К);
- два транзистора КТ972А (обозначение – VT 1, VT 2; Б – база, К – коллектор, Э – эмиттер);



- два диода (обозначение – VD 1, VD 2; A – анод, К – катод);
- общий заземляющий канал (обозначение – GND).

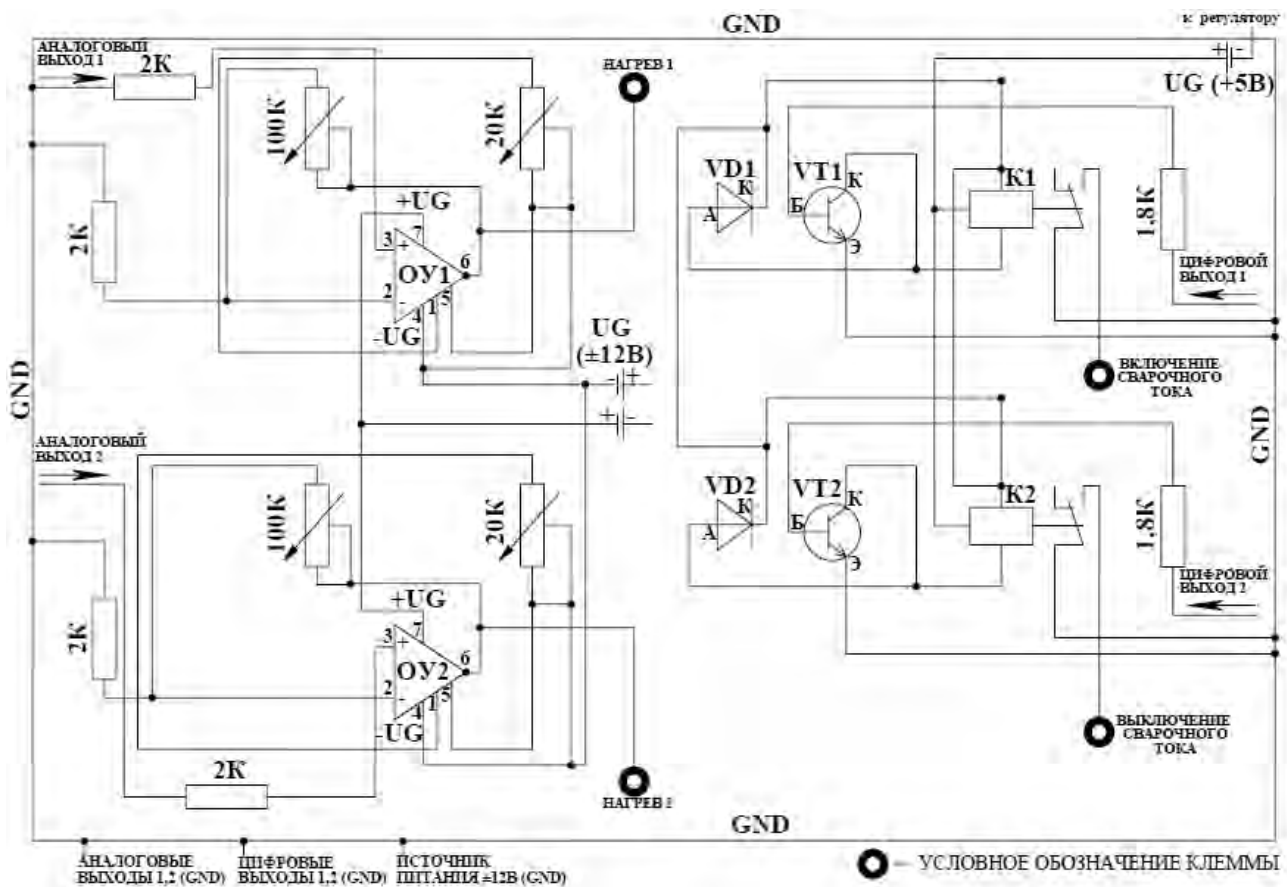


Рисунок 2.13 – Принципиальная электрическая схема блока согласования системы автоматического управления процессом КРС

Цепь регулирования аналоговых сигналов управления дает возможность их усиления для последующего воздействия на позиции «НАГРЕВ 1» (при КРС одним импульсом тока) и «НАГРЕВ 2» (при КРС двумя последовательными импульсами тока) регулятора цикла сварки. При этом операционные усилители КРУД708 производят отдельную балансировку сигналов переменными резисторами 20 кОм (на схеме обозначены как 20 К) и их регулировку до требуемого уровня переменными резисторами 100 кОм (на схеме обозначены как 100 К). Этот процесс происходит в обратной связи, причем с изменением коэффициента усиления сигнала. В результате при КРС осуществляется регулировка амплитуды нарастания импульса тока от минимального значения, определенного для каждой ступени сварочного трансформатора, до максимального I_{CBmax} .

Цепь, пропускающая цифровые сигналы управления, усиливает их (сигналы напряжения) для последующего воздействия на позиции (входы) «ЗАДЕРЖКА ЦИКЛА НА ПОЗИЦИИ «СЖАТИЕ» и «ОГРАНИЧЕНИЕ СВАРОЧНОГО ТОКА» регулятора цикла сварки (например, типа РКС-801). Первый цифровой

сигнал напряжения замыканием контакта электромагнитного реле запускает команду «ВКЛЮЧЕНИЕ ТОКА», а второй цифровой сигнал – команду «ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТОКА». Происходит это в определенные моменты времени, когда энергия, фактически вводимая в межэлектродную зону на конкретной ступени импульса тока, достигает заданного значения. Первоначальные настройки регулятора цикла сварки при этом игнорируются.

В конечном счете с выходов блока согласования усиленные сигналы управления поступают на аналоговые входы регулятора цикла сварки посредством специального кабеля РШАВКУ-14 (кабель управления).

2.5 Аналого-цифровое устройство сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS

Устройство NI USB 6251, лежащее в основе предложенной системы автоматического управления процессом рельефной сварки, является представителем современного оборудования аналого-цифрового типа, позволяющего не только регистрировать параметры сварочного процесса посредством различных датчиков, но и осуществлять внешнее воздействие на контактную машину непосредственно в процессе КРС с соблюдением принципа обратной связи и игнорированием первоначальных настроек регулятора цикла сварки.

Устройство NI USB 6251 сконструировано в виде портативной микросхемной платы, выполняющей функции универсального преобразователя сигналов. Данная плата обладает возможностью регистрации своими входами различных электрических сигналов со стороны внешних устройств. Кроме того, своими аналоговыми и цифровыми выходами данное устройство способно генерировать сигналы управления на данные (внешние) устройства (рисунок 2.14) [128–130].



Рисунок 2.14 – Устройство сбора данных NI USB 6251

В состав устройства NI USB 6251 входит аналого-цифровой преобразователь (далее – АЦП). Считается, что с повышением точности АЦП и количества интервалов измерения сигналов, зависящих от быстродействия АЦП и объема памяти ОЗУ, повышается и точность измерения сигналов.

Усиление сигналов, регистрируемых устройством NI USB 6251, происходит в дифференциальной схеме подключения и в соответствии со следующими запрограммированными повышающими коэффициентами (PGA): 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20. Значение коэффициента усиления при регистрации конкретного сигнала вычисляется автоматически в зависимости от диапазона входного напряжения.

При регистрации аналоговых сигналов АЦП переводит их в цифровые коды, т. е. дискретизирует. Возможны как однократное, так и многократное преобразование аналоговых сигналов (в виде большого числа выборок).

Для хранения всех получаемых данных и предотвращения их потери при операциях преобразования аналоговых сигналов в устройстве NI USB 6251 предусмотрен буфер операций аналогового ввода (AI FIFO).

Среда LVW 2010, позволяющая посредством ЭВМ работать с устройством NI USB 6251, представляет собой универсальное программное обеспечение, инструментарий которого дает возможность создавать виртуальные приборы, имитирующие различную электротехническую аппаратуру. Данные виртуальные приборы используются для фиксации, сохранения, визуализации и обработки сигналов, зарегистрированных устройством NI USB 6251 посредством различных датчиков.

При этом среда LVW 2010 позволяет создавать не только имитации процесса работы различной аппаратуры (приборов, регуляторов, датчиков), но и программируемые последовательности (ход) протекающих через них электрических сигналов вне зависимости от их типа и величины. В решении этой задачи существенную роль играет мощная инструментальная библиотека виртуальных приборов, которой оснащена среда LVW 2010 [131].

Таким образом, применение устройства NI USB 6251 с возможностью его многократного перепрограммирования средой LVW 2010 на графическом языке «G» может позволить непосредственно в процессе КРС (в режиме реального времени) осуществить внешнее управление контактной машиной с автоматической регулировкой основных параметров режима сварки по принципу обратной связи. Конечной целью такого процесса является регулируемое поэтапное дозированное введение в межэлектродную зону величины энергии, рассчитанной по уравнению теплового баланса и уменьшенной в сравнении с расчетным значением при оптимизации [132–135].

2.6 Разработка графического программного кода для автоматического управления процессом КРС в реальном времени в среде LABVIEW

Управление процессом КРС в режиме реального времени (без остановки процесса сварки) подразумевает собой последовательность следующих действий.

1 Регистрация электрических сигналов процесса сварки с помощью различных датчиков.

2 Кабельная передача зарегистрированных сигналов от датчиков к устройству сбора данных.

3 Преобразование зарегистрированных сигналов на устройстве сбора данных (преобразование формы сигналов, вычисление на их основе требуемых величин).

4 Инициация управляющих сигналов напряжения устройством сбора данных (для последующего воздействия на регулятор цикла сварки).

5 Кабельная передача управляющих сигналов от устройства сбора данных на блок согласования (усиления).

6 Кабельная передача управляющих сигналов от блока согласования (усиления) на регулятор цикла сварки.

7 Корректировка позиций регулятора, отвечающих за задание величины тока, а также за его отключение, с игнорированием первоначальных настроек (эффект от воздействия управляющих сигналов).

Применительно к вышеуказанной разработанной системе автоматического управления процессом КРС действия 3 и 4 возможно осуществить только при наличии графического программного кода среды LVW 2010, который должен управлять работой устройства сбора данных NI USB 6251.

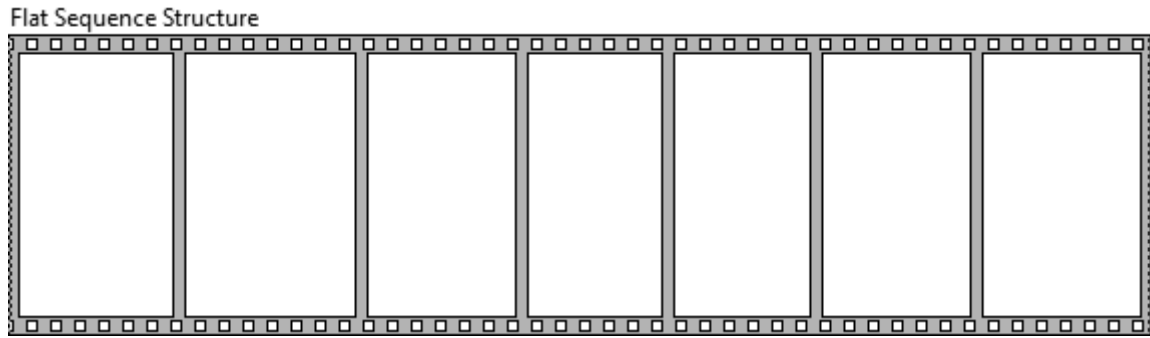
Такой графический программный код (имитационная модель) представляет собой кадровую последовательность (рисунок 2.15, *а*), в каждом кадре которой создается цикл, выполняющий конкретную функцию при управлении процессом КРС (рисунок 2.15, *б*).

При этом в пределах кадровой последовательности создаваемые циклы (приема и обработки сигналов, их генерации и т. д.) должны срабатывать в строгой последовательности, т. е. один за другим.

В первом кадре создается цикл общего запуска системы автоматического управления процессом КРС в работу от нажатия сварщиком педали машины (рисунок 2.16). Для этого в цикл добавляются виртуальный блок «DAQ Assist Input», настраиваемый для приема одного цифрового сигнала за один цикл измерения (опция «1 Sample (On Demand)») (рисунок 2.17), и блок сравнения «Comparison» для распознавания логического цифрового сигнала напряжения величиной 5 В.



a)



б)

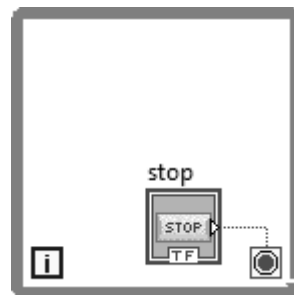


Рисунок 2.15 – Кадровая последовательность (a) и оператор цикла (б)

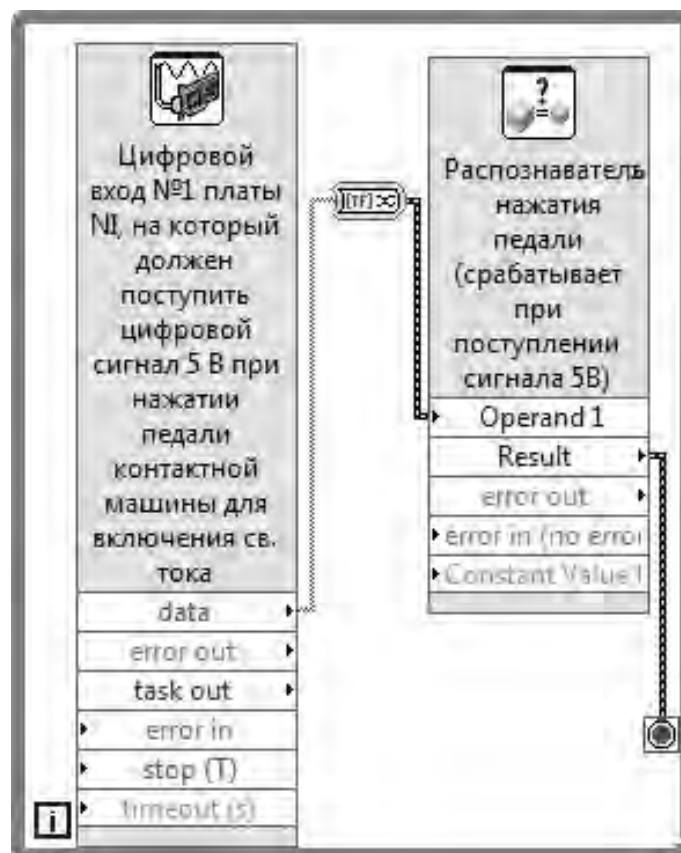


Рисунок 2.16 – Цикл общего запуска системы автоматического управления процессом КРС в работу

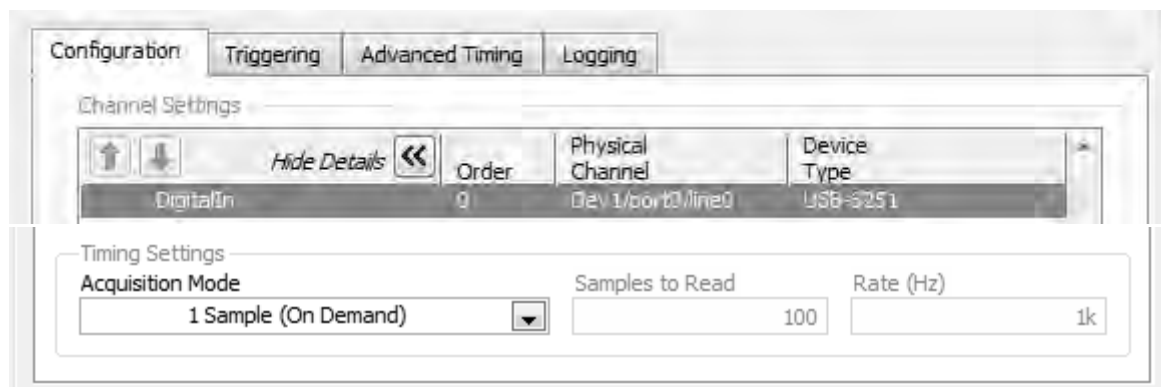


Рисунок 2.17 – Меню настройки цифрового входа в виртуальном блоке «DAQ Assist Input» устройства NI USB 6251, предназначенном для приема цифрового сигнала

Работа первого цикла описывается следующим образом. При нажатии кнопки «ПУСК» программная среда ожидает момента поступления на цифровой вход данного цикла цифрового сигнала величиной 5 В со стороны цифрового выхода устройства NI USB 6251. Это происходит при нажатии сварщиком педали контактной машины и срабатывании электромагнитного реле устройства согласования (напряжение срабатывания реле до 24 В), после чего за программное время 1 нс цикл выключается и начинается следующий цикл кадровой последовательности. Таким образом, фактически происходит общий запуск системы автоматического управления процессом КРС в работу.

Во втором кадре создается цикл формирования аналогового сигнала напряжения, пропорционального величине тока на первой ступени импульса (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Цикл координатного задания величины напряжения, пропорционального сварочному току на первой ступени импульса при его ступенчатом задании

Для этого в цикл добавляются виртуальный блок «DAQ Assist Output», настраиваемый для генерации одного аналогового сигнала за один цикл измерения (опция «N Samples») (рисунок 2.19), и блок «Simulate Arbitrary Signal» для координатного задания сигнала постоянного напряжения, пропорционального току на первой ступени импульса (рисунок 2.20). Дополнительный блок «Elapsed Time» с опцией «Time Target» обеспечивает задержку 0,01 с до начала следующего цикла.

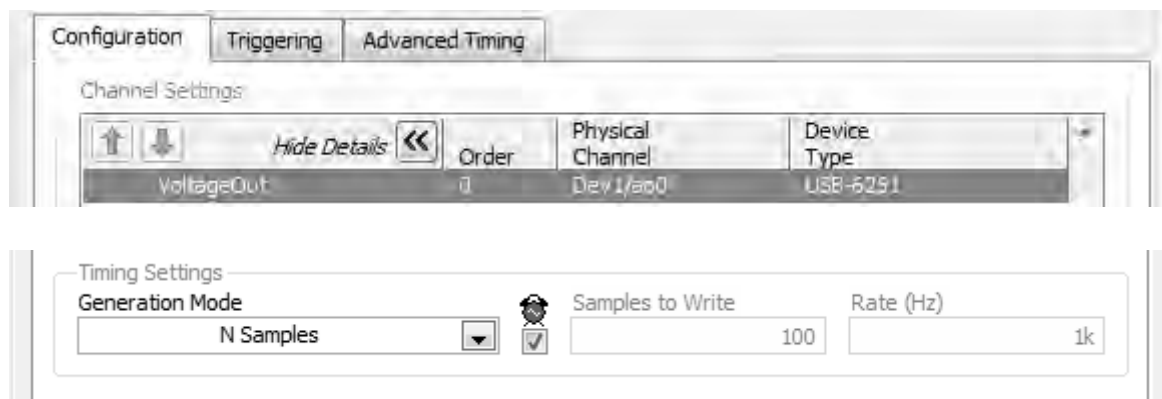


Рисунок 2.19 – Меню настройки аналогового выхода в виртуальном блоке «DAQ Assist Output» устройства NI USB 6251, предназначенном для генерирования аналогового сигнала

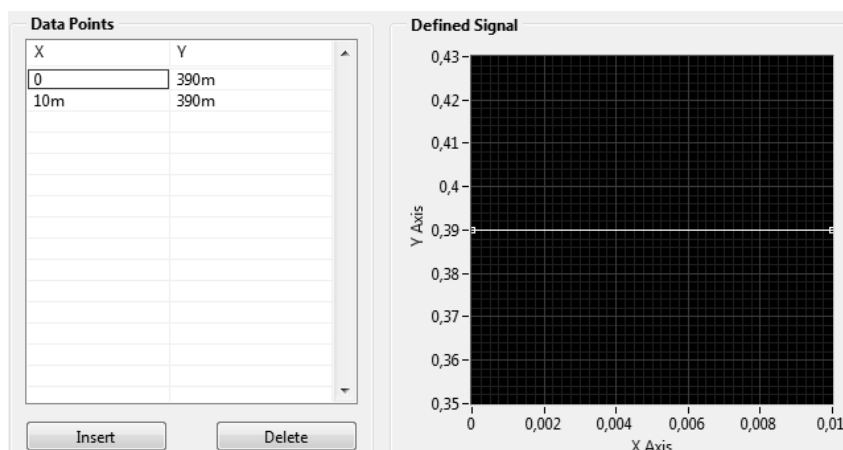


Рисунок 2.20 – Меню блока координатного задания сигнала постоянного напряжения, пропорционального сварочному току на первой ступени импульса

Работа второго цикла описывается следующим образом. После нажатия педали контактной машины с одновременным общим запуском программы автоматического управления процессом КРС через время, равное 1 нс, один из двух аналоговых выходов устройства NI USB 6251 генерирует сигнал постоянного напряжения, пропорциональный величине сварочного тока на первой ступени импульса. Данный аналоговый сигнал за время 0,01 с поступает на

устройство согласования (для усиления), а затем на регулятор цикла сварки и блок поджига тиристоров. Таким образом, контактная машина получает сигнал задания требуемого сварочного тока в начале процесса КРС (на первой ступени импульса тока), после чего выдерживается пауза 0,01 с перед срабатыванием электромагнитного реле устройства согласования, которое должно будет далее фактически включить ток. Общая продолжительность второго цикла составляет 0,02 с.

В третьем кадре создается цикл запуска электромагнитного реле, отвечающего за фактическое включение сварочного тока (рисунок 2.21).



Рисунок 2.21 – Цикл запуска электромагнитного реле, отвечающего за фактическое включение сварочного тока

Для этого в цикл добавляются виртуальный блок «DAQ Assist Output», настраиваемый для генерации за один цикл измерения двух цифровых сигналов двумя из 24 цифровых входов/выходов устройства NI USB 6251 (опция «1 Sample (On Demand)») (рисунок 2.22), а также блоки «True Constant», «False Constant» и «Build array» для создания вариативной области логических условий. При этом условие «True» соответствует подаче цифрового сигнала на первый цифровой выход устройства NI USB 6251 и дальнейшему включению электромагнитного реле, отвечающего за включения сварочного тока. Условие «False» соответствует подаче цифрового сигнала на второй цифровой выход устройства NI USB 6251 и дальнейшему включению электромагнитного реле, отвечающего за выключение сварочного тока. Дополнительный блок «Elapsed Time» с опцией «Time Target» обеспечивает требуемую временную задержку, связанную с длительностью предварительного сжатия электродов, изначально настраиваемой на регуляторе цикла сварки контактной машины.

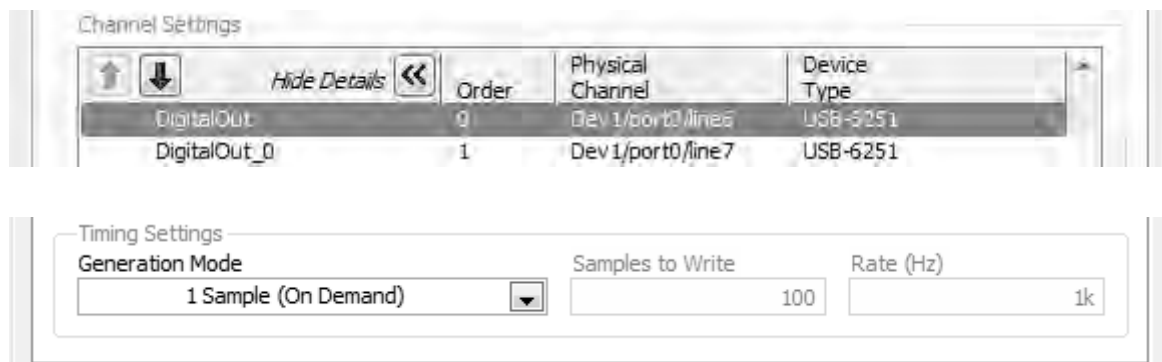


Рисунок 2.22 – Меню настройки цифровых выходов в виртуальном блоке «DAQ Assist Output» устройства NI USB 6251, предназначенном для генерирования двух цифровых сигналов

Работа третьего цикла описывается следующим образом. Через 1 нс после срабатывания второго цикла (задание сигнала постоянного напряжения, пропорционального сварочному току на первой ступени импульса) один из цифровых выходов устройства NI USB 6251 подает цифровой сигнал постоянного напряжения на первое электромагнитное реле (напряжение срабатывания до 5 В), и оно замыканием своего контакта за время 0,005 с отправляет данный сигнал на регулятор цикла сварки. Далее регулятор цикла сварки за время 0,01 с передает этот сигнал на блок поджига тиристоров. Таким образом, происходит фактическое включение сварочного тока за время около 0,015 с. Общая продолжительность третьего цикла составляет 0,015 с без учета времени, равного длительности предварительного сжатия электродов в периодах (задается на регуляторе цикла сварки и в программе).

В четвертом кадре создается цикл для регистрации и обработки двух аналоговых сигналов процесса КРС на первой ступени импульса тока, а также для сравнения энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, с задаваемым (требуемым) значением (рисунок 2.23).

Для этого в цикл добавляется виртуальный блок «DAQ Assist Input», настраиваемый для регистрации (за один цикл измерения) двух мгновенных аналоговых синусоидальных сигналов процесса КРС: сигнала переменного напряжения межэлектродной зоны и сигнала переменного напряжения, пропорционального сварочному току. Сигналы регистрируются двумя аналоговыми входами устройства NI USB 6251 (опция «Continuous Samples»). При этом блок «DAQ Assist Input» считывает сигналы в виде 11 точек («сэмплов») при частоте 1000 Гц (рисунок 2.24), поэтому временной интервал регистрации составляет 0,01 с.

Для разделения двух регистрируемых сигналов применяется оператор деления сигнала «Split Signals». Для преобразования синусоидальной формы регистрируемых сигналов напряжения в кривые их действующих значений на каждом из временных интервалов, равных 0,01 с, используется виртуальный

блок «Average DC/RMS». Для получения кривой действующих значений сварочного тока дополнительно вводится тарифовочный коэффициент. Оператор умножения сигналов « $\times$ » применяется для получения кривой действующих значений мощности P_{Σ} , выделяемой в межэлектродной зоне, а также для учета тарифовочного коэффициента. Виртуальный блок «Totalize» категории «Real Time», обеспечивающий расчет интеграла Римана, позволяет рассчитывать энергию, фактически вводимую в межэлектродную зону за каждый интервал регистрации сигналов (0,01 с), а также аккумулировать значение суммарной энергии $Q_{\Sigma 1}$, вводимой на данной ступени импульса тока.



Рисунок 2.23 – Цикл регистрации и обработки двух аналоговых сигналов процесса КРС и отслеживания энергии, вводимой в межэлектродную зону

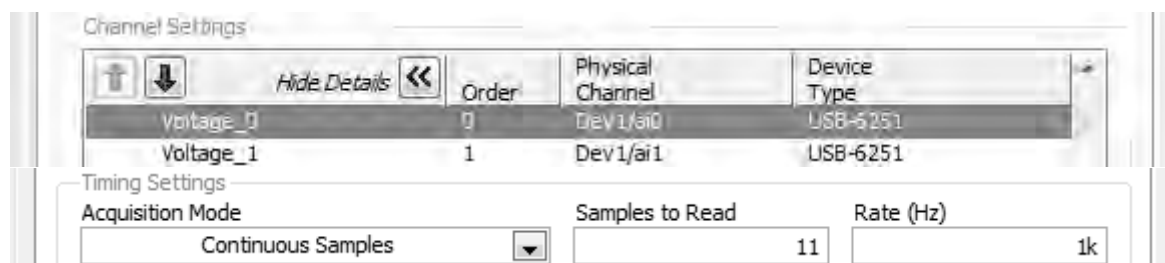


Рисунок 2.24 – Меню настройки двух аналоговых входов в виртуальном блоке «DAQ Assist Input» устройства NI USB 6251, предназначенном для регистрации двух аналоговых сигналов процесса КРС

Необходимо отметить, что активное (работоспособное) состояние блока «Totalize» возможно только в случае создания проекта LVW 2010 путем последовательного нажатия опций «File» / «New Project» / «Add» и добавления всей кадровой последовательности циклов в созданный проект. Выход «Total» блока «Totalize» соединяется с оператором сравнения для отслеживания момента достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону, заданного (требуемого) значения (для данной ступени импульса сварочного тока).

Работа четвертого цикла описывается следующим образом. Через заданное время на предварительное сжатие электродов (после срабатывания третьего цикла и, соответственно, включения сварочного тока) два аналоговых входа устройства NI USB 6251 начинают регистрировать два синусоидальных сигнала с датчиков сварочного тока и напряжения точками («сэмплами») в количестве 11 шт., т. е. на десяти отрезках времени, равных 0,001 с. Одновременно за каждый временной интервал, равный 0,01 с, данные сигналы обрабатываются с получением значений энергии, вводимой в межэлектродную зону. Полученные значения энергии аккумулируются в виде числа, которое сравнивается с заданным значением, изначально внесенным в ячейку цикла. В случае достижения энергией, вводимой в межэлектродную зону на первой ступени импульса тока, заданного значения происходит три одновременных действия:

1) четвертый цикл завершается за фактическое время, определяемое моментом достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону, заданного значения;

2) аналоговые входы устройства NI USB 6251 обнуляются;

3) блок аккумуляции энергии обнуляется.

Пятый кадр начинается через 1 нс после окончания четвертого цикла (и четвертого кадра соответственно).

В пятом кадре создаются сразу два цикла (6 и 7): цикл формирования аналогового сигнала напряжения, пропорционального величине сварочного тока на второй ступени его импульса (по аналогии с кадром № 2), и цикл для регистрации и обработки двух аналоговых сигналов процесса КРС на второй ступени импульса тока, а также для сравнения энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, с задаваемым (требуемым) значением (по аналогии с кадром № 4). Общая длительность всего цикла равна фактическому времени достижения энергией, вводимой в межэлектродную зону, заданного (требуемого) значения.

В случае достижения энергией, вводимой в межэлектродную зону на второй ступени импульса тока, заданного значения происходит три одновременных действия:

1) циклы 6 и 7 завершаются за фактическое время, определяемое моментом достижения энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону на данной ступени импульса тока, заданного значения;



- 2) аналоговые входы устройства NI USB 6251 обнуляются;
- 3) блок аккумуляции энергии обнуляется.

В шестом кадре создается цикл 8 для запуска электромагнитного реле, отвечающего за фактическое выключение сварочного тока (рисунок 2.25).



Рисунок 2.25 – Цикл запуска электромагнитного реле, отвечающего за фактическое выключение сварочного тока

Восьмой цикл создается по аналогии с третьим, но здесь уже срабатывает второе нормально замкнутое электромагнитное реле (напряжение срабатывания до 5 В), размыканием своего контакта выключающее сварочный ток. Следующий цикл начинается через паузу, равную 0,01 с и обеспечиваемую виртуальным блоком «Elapsed Time».

В седьмом кадре создается цикл 9 (по аналогии с третьим и восьмым) для сброса обоих электромагнитных реле устройства согласования в исходное состояние по логическому условию «ЛОЖЬ» за время около 0,005 с. Виртуальный блок «Elapsed Time» позволяет задавать паузу до следующего цикла сварки (рисунок 2.26).

Таким образом, в процессе КРС вышеуказанная кадровая последовательность программного кода, создаваемая в среде LVW 2010, позволяет игнорировать первоначальные настройки регулятора цикла сварки контактной машины и осуществлять следующие основные действия:

- задавать многоступенчатый импульс сварочного тока, который может включать ступени предварительного подогрева металла свариваемых деталей, его основного (сварочного) нагрева и последующей термообработки (количество ступеней импульса тока не ограничивается);
- на каждой из ступеней импульса тока в режиме реального времени (каждые 0,01 с):

а) регистрировать два сигнала – напряжения, пропорционального сварочному току, и напряжения межэлектродной зоны;

б) рассчитывать кривые действующих значений тока и напряжения, а также сопротивления и мощности межэлектродной зоны (в случае необходимости);

в) рассчитывать кривую энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, и сравнивать ее пиковое значение с изначально заданным в программном коде (расчетным значением по УТБ);

– выключать сварочный ток или изменять его значение (увеличивать/уменьшать ступень импульса в соответствии с его формой) по достижении энергией, фактически вводимой в межэлектродную зону на данной ступени импульса, заданного значения.



Рисунок 2.26 – Цикл сброса обоих электромагнитных реле в исходное состояние и задания программной паузы до следующего цикла КРС

Даже без модернизации УТБ применительно к КРС созданный программный код дает возможность дозированного поэтапного введения в межэлектродную зону заданной (расчетной) энергии путем пропускания через нее многоступенчатого импульса тока.

Следует отметить, что общеизвестные регуляторы цикла сварки типа РКС-801, РВИ-801 и аналогичные им, которые широко используются и сегодня на многих предприятиях постсоветского пространства при комплектации контактных машин, способны изменять крутизну нарастания и амплитуду импульсов сварочного тока непосредственно в процессе КРС и точечной сварки. Также данные регуляторы могут самопроизвольно с установленной точностью ($\pm 2...3$ периода) изменять длительность протекания импульсов тока, задаваемую в периодах сетевого напряжения, о чем зачастую напрямую прописано в техпаспортах. При КРС это может приводить к преждевременному выключению тока или увеличению длительности его протекания, что в условиях непрерывной работы машины отследить невозможно.

Регуляторы цикла сварки при одноимпульсном режиме работы способны изменять лишь плавность нарастания импульса тока (функция регулятора «модуляция») до некоторого максимального значения, которое устанавливается изначально при настройке позиции регулятора «НАГРЕВ» номерами от 0 до 9. Однако такой способ модуляции (искусственной) при КРС не является эффективным, т. к. в начале самого процесса сварки из-за скачка сопротивления межэлектродной зоны всегда происходит естественная модуляция тока, т. е. плавное его нарастание по амплитуде. При этом и в том, и в другом случае исключить появление выплесков расплавленного металла не удастся.

По этой причине при КРС любых соединений существует необходимость придания импульсу тока многоступенчатой формы. Трехступенчатый импульс тока, сформированный средой LVW 2010, представлен на рисунке 2.27.

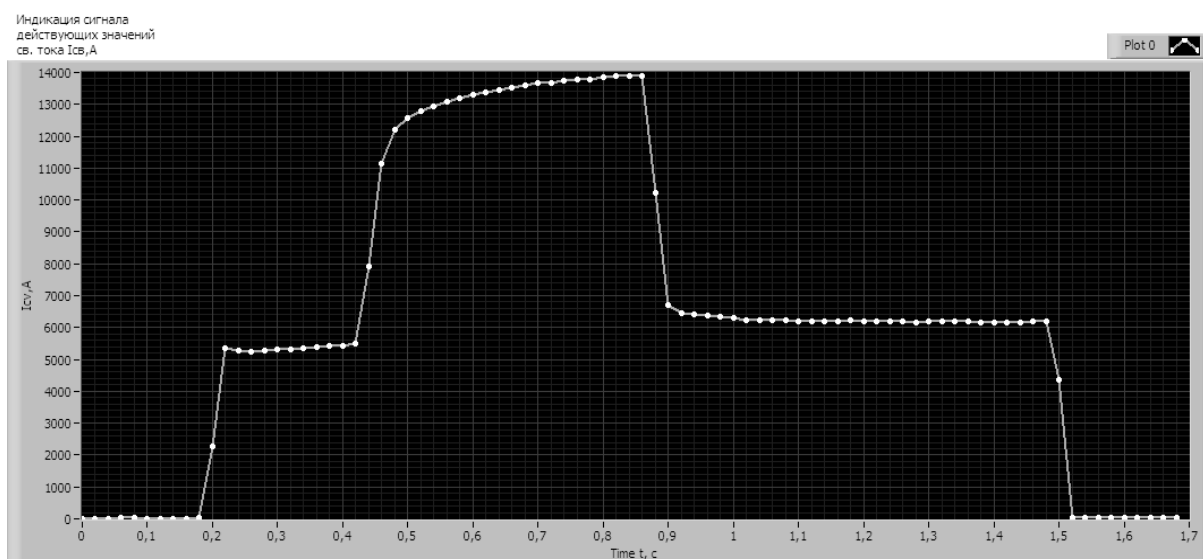


Рисунок 2.27 – Кривая трехступенчатого импульса тока при его задании в среде LVW 2010

Диапазон импульсов постоянного напряжения, задающих сварочный ток, определяется экспериментально для каждой сварочной машины. Например, для регулятора цикла сварки РКС-801 при управлении машиной МТ-1617 данный диапазон может лежать в пределах от 0 до 0,065 В (в одном из вариантов настройки регулятора) [127], а при управлении машиной МТ-3201 – в пределах от 0,2 до 0,39 В (таблица 2.1) [51].

В случае трехступенчатого поэтапного дозированного ввода энергии в межэлектродную зону общая временная схема процесса управления регулятором цикла сварки будет выглядеть так, как показано на рисунке 2.28.

Следует отметить, что если энергия, фактически вводимая в межэлектродную зону, в процессе КРС не достигает требуемого значения на любой из ступеней импульса тока (что крайне маловероятно, т. к. длительность протекания

импульса на регуляторе цикла сварки задается с большим запасом), то программный код среды LVW 2010 через небольшой заданный интервал времени (несколько больший, чем предполагаемое время достижения требуемого значения энергии) включит реле, ответственное за выключение тока, и сбросит оба реле в исходное состояние, что, в свою очередь, приведет к завершению работы программного кода среды LVW 2010 и его ожиданию следующего цикла сварки.

Таблица 2.1 – Диапазон управляющих напряжений для регулятора цикла сварки РКС-801 и контактных машин типа МТ-1617 и МТ-3201

Для машины МТ-1617		Для машины МТ-3201	
Управляющее напряжение, В	Фактический сварочный ток, кА	Управляющее напряжение, В	Фактический сварочный ток, кА
0,20	I_{CBmax}	0	I_{CBmax}
0,25	$0,97I_{CBmax}$	0,025	$0,85I_{CBmax}$
0,26	$0,94I_{CBmax}$	0,03	$0,83I_{CBmax}$
0,27	$0,91I_{CBmax}$	0,035	$0,8I_{CBmax}$
0,275	$0,88I_{CBmax}$	0,04	$0,64I_{CBmax}$
0,28	$0,85I_{CBmax}$	0,045	$0,62I_{CBmax}$
0,29	$0,82I_{CBmax}$	0,05	$0,5I_{CBmax}$
0,30	$0,78I_{CBmax}$	0,055	$0,48I_{CBmax}$
0,305	$0,75I_{CBmax}$	0,06	$0,43I_{CBmax}$
0,31	$0,72I_{CBmax}$	0,065	$0,41I_{CBmax}$
0,315	$0,69I_{CBmax}$	—	—
0,32	$0,65I_{CBmax}$	—	—
0,33	$0,63I_{CBmax}$	—	—
0,34	$0,60I_{CBmax}$	—	—
0,35	$0,56I_{CBmax}$	—	—
0,36	$0,52I_{CBmax}$	—	—
0,37	$0,48I_{CBmax}$	—	—
0,38	$0,45I_{CBmax}$	—	—
0,39	$0,41I_{CBmax}$	—	—

Визуализация зарегистрированных и преобразованных сигналов процесса КРС возможна в двух вариантах – за весь процесс сварки и за отдельно взятый временной интервал снятия сигналов.

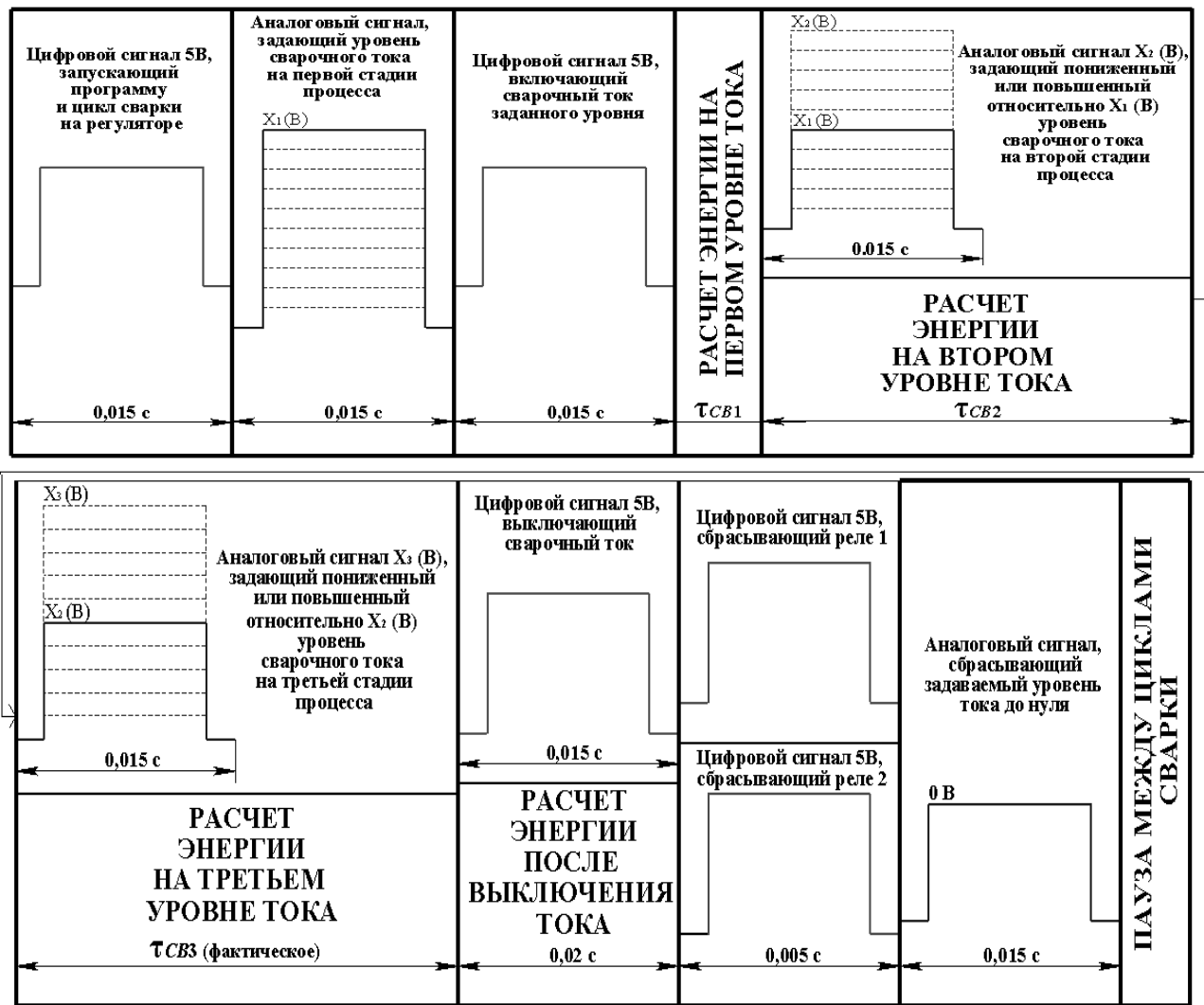


Рисунок 2.28 – Общая временная схема процесса управления регулятором цикла сварки

Для возможности визуализации сигналов в среде LVW 2010 предусмотрены отдельное рабочее клеточное поле и опции виртуальных блоков построения графиков или чатов «Graph Indicators» (рисунок 2.29).

В первом варианте виртуальные блоки построения графиков отражают зарегистрированные синусоидальные сигналы напряжения межэлектродной зоны и напряжения, пропорционального сварочному току, в абсолютном времени (рисунок 2.30) [136].

Кривые действующих значений параметров процесса КРС отражаются в относительном времени. На рисунке 2.31 представлены кривые для сварочного тока, напряжения межэлектродной зоны и энергии, вводимой в эту зону (кривые сопротивления и мощности межэлектродной зоны здесь не представлены).

Во втором варианте поле построения графиков среды LVW 2010 отражает все сигналы и кривые параметров процесса КРС за отдельно взятый временной интервал снятия сигналов. Например, в случае настройки виртуального блока приема сигналов «DAQ Assist Input» на считывание десяти «сэмплов» при

частоте 1000 Гц временной интервал регистрации составит 0,009 с. Внешний вид регистрируемых сигналов представлен на рисунке 2.32 [51].

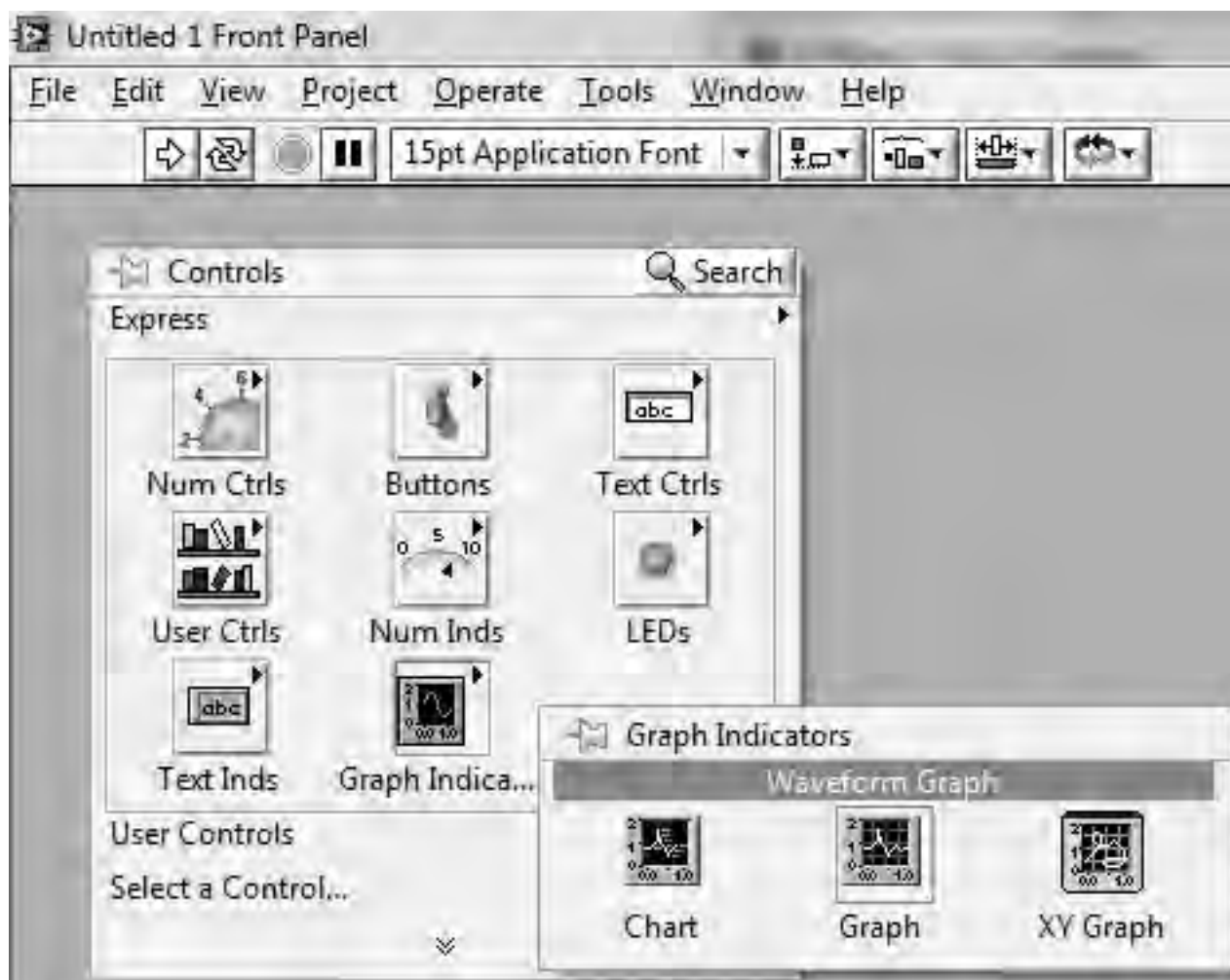


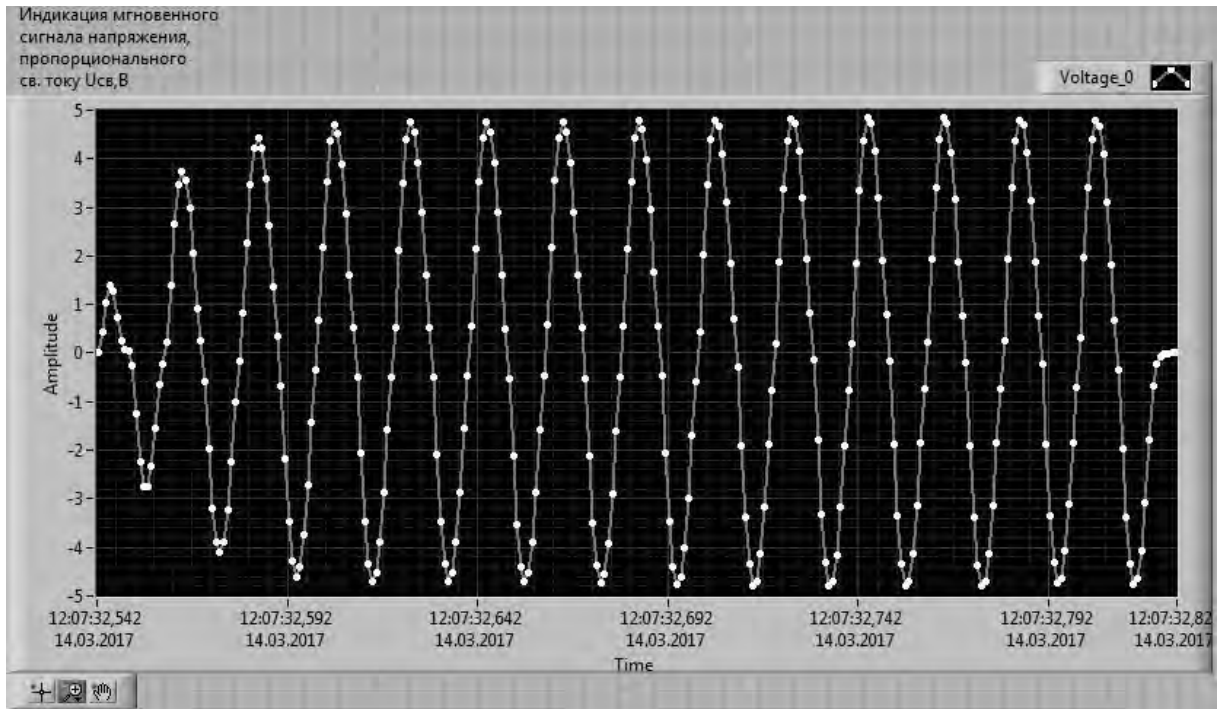
Рисунок 2.29 – Рабочее поле создания блоков построения графиков и чатов в среде LVW 2010

Кривая нарастания величины энергии, вводимой в межэлектродную зону за 0,009 с, представлена на рисунке 2.33, *а*. Чат индикации аккумуляции пиковых значений энергии, вводимой в межэлектродную зону, вплоть до перехода на следующий кадр программного кода среды LVW 2010, представлен на рисунке 2.33, *б*.

Значения энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону при КРС, можно сравнивать с расчетными, изначальное задание которых в программном коде среды LVW 2010 зависит от требований, которые предъявляются к структуре формируемых соединений [136]:

- с полным проплавлением металла свариваемых деталей;
- с частичным проплавлением;
- без расплавления (в твердой фазе).

а)



б)

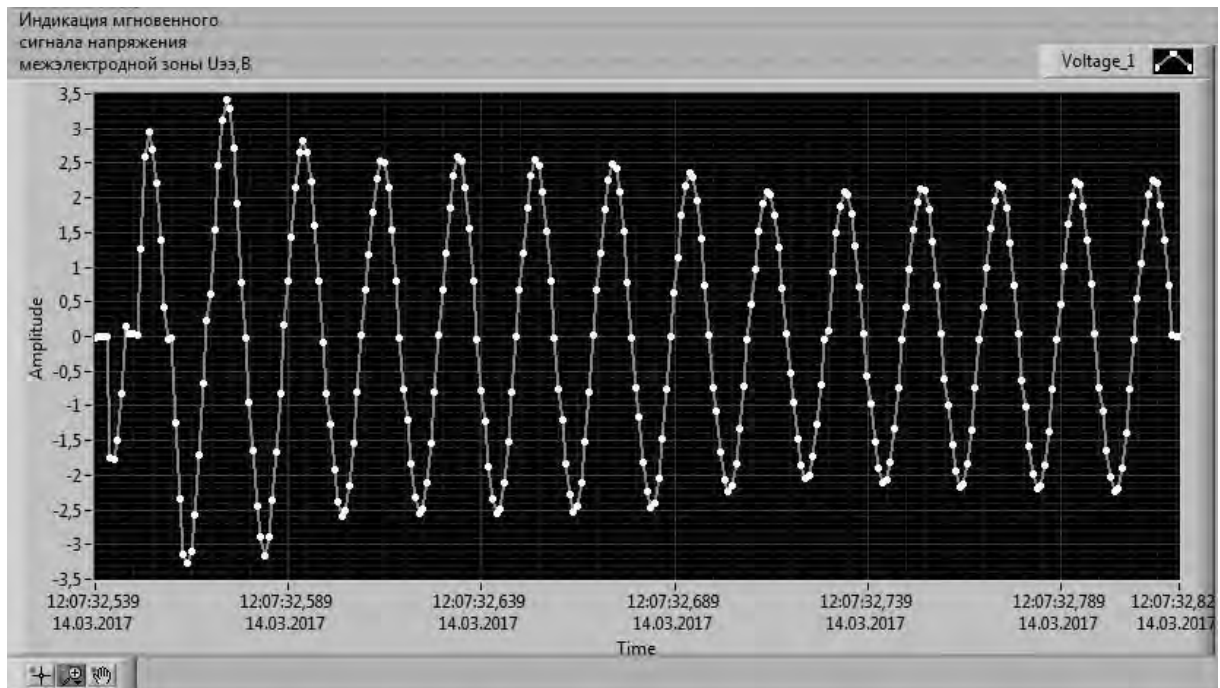


Рисунок 2.30 – Синусоидальные сигналы напряжения, пропорционального сварочному току (а), и напряжения межэлектродной зоны (б) (в абсолютном времени)

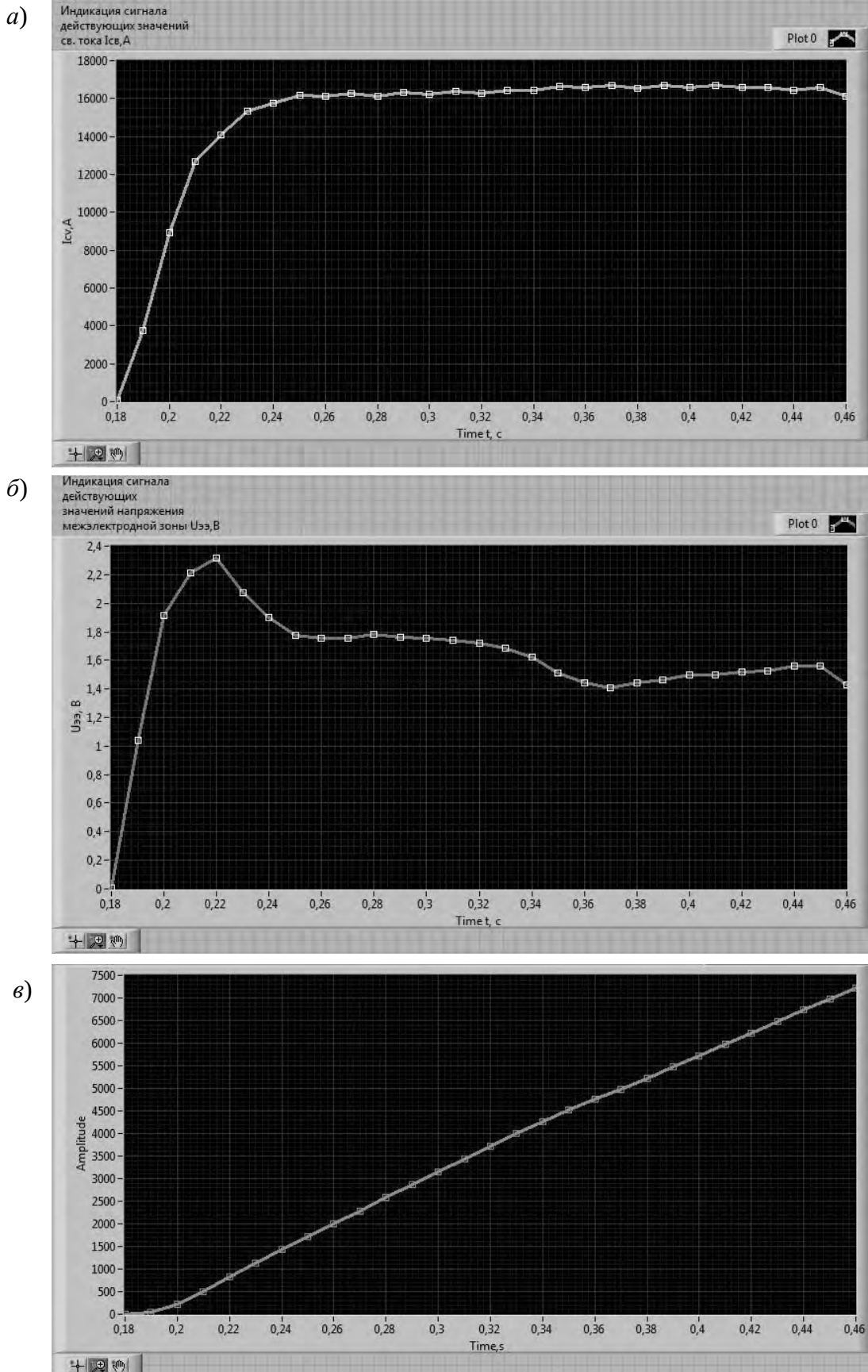


Рисунок 2.31 – Кривые действующих значений сварочного тока (а) и напряжения межэлектродной зоны (б) и значений энергии, вводимой в эту зону (в) (в относительном времени)

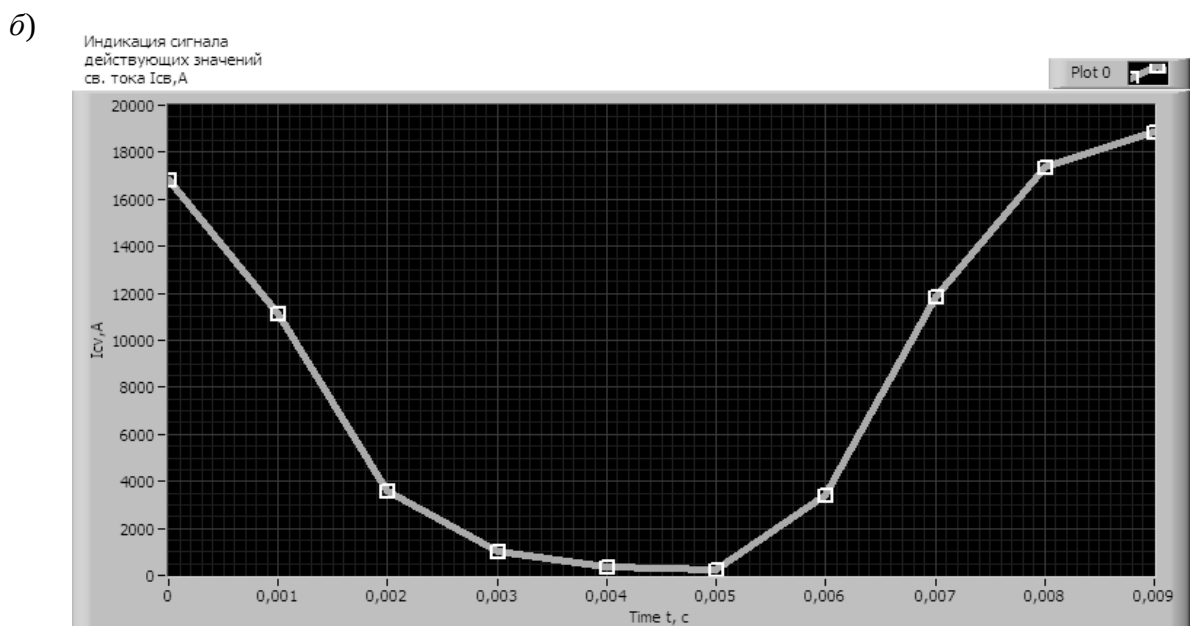
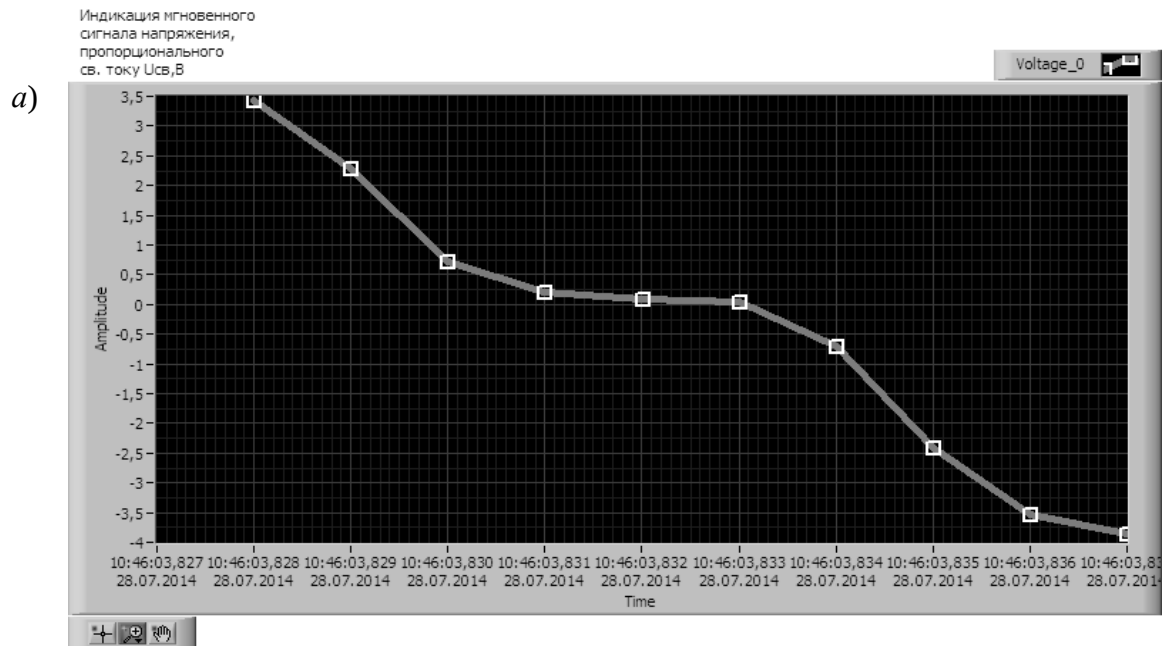
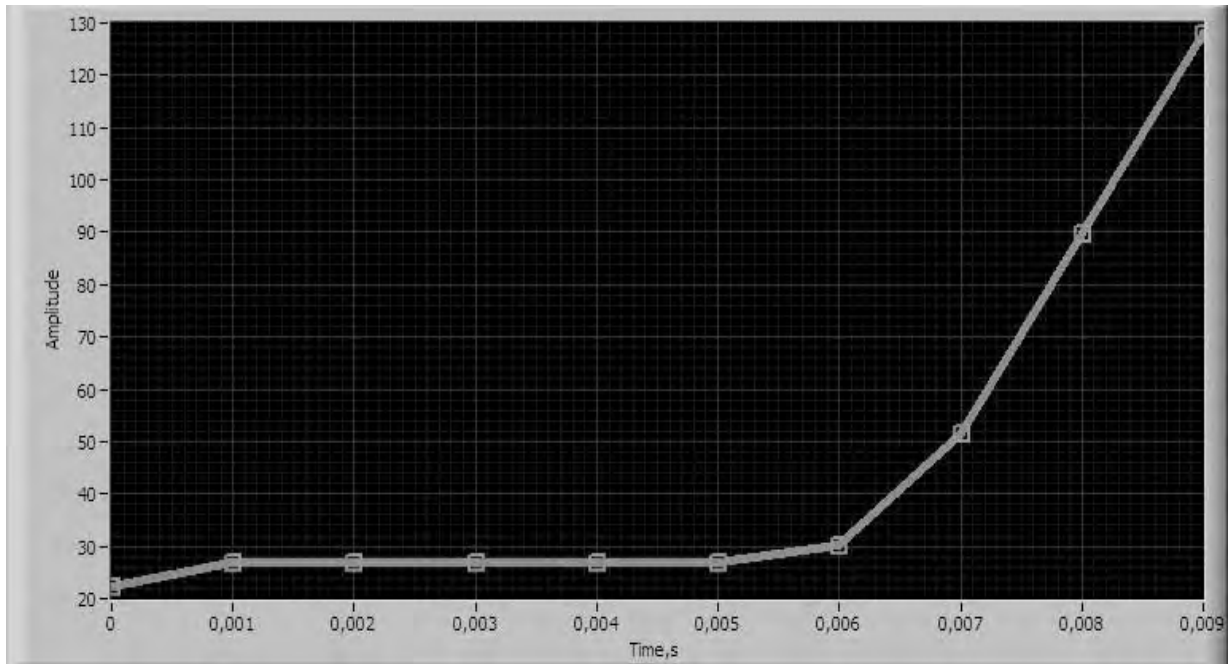


Рисунок 2.32 – Синусоидальный сигнал напряжения, пропорционального сварочному току (а) (за один из абсолютных временных интервалов, равных 0,009 с), и кривая действующих значений сварочного тока (б) (за такой же относительный временной интервал)

а)



б)

График энергии на первом
участке кривой св. тока

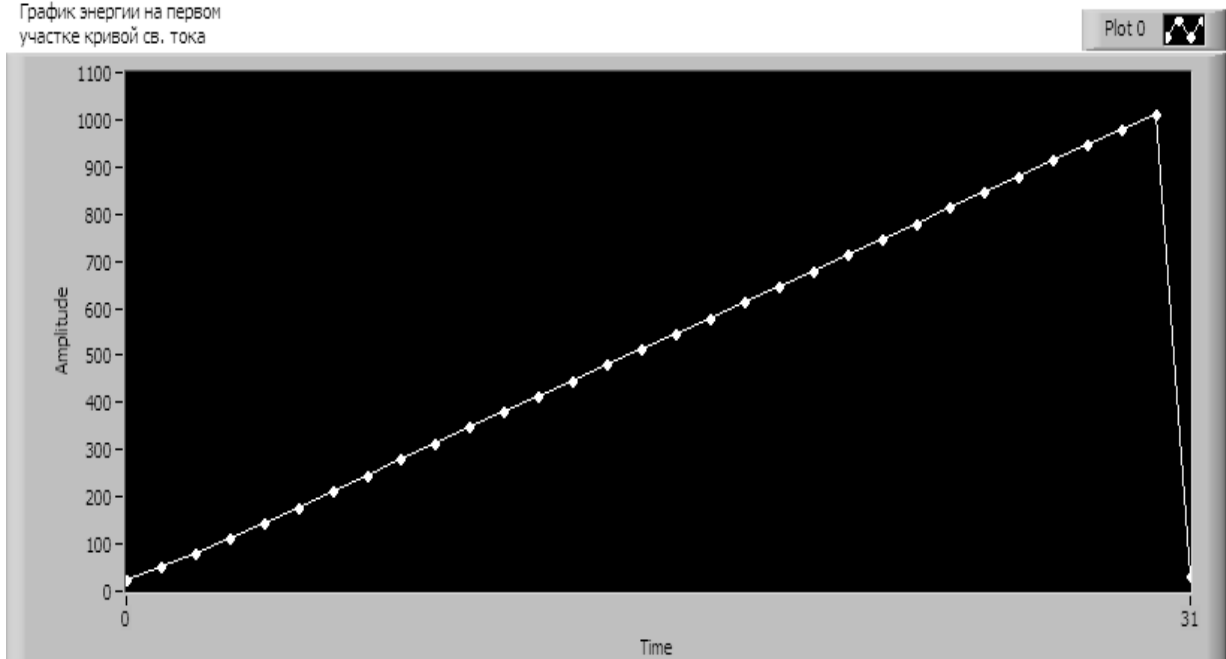
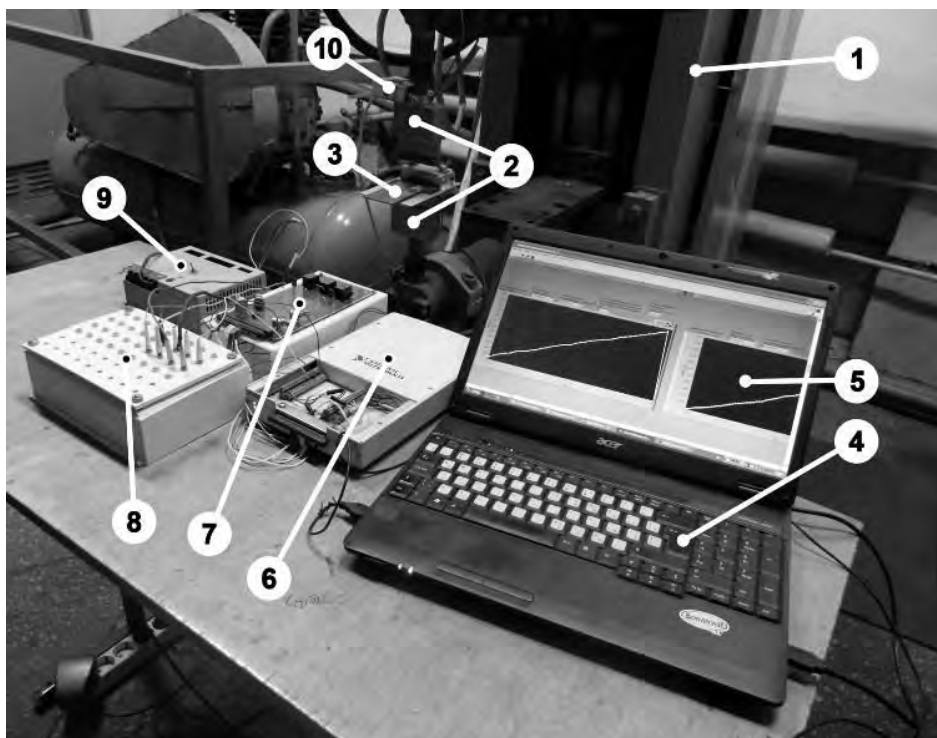


Рисунок 2.33 – Энергия, вводимая в межэлектродную зону за 0,009 с (а) и за часть процесса КРС (на определенной ступени импульса тока) (б)

2.7 Разработка прибора САУ КРС «Энергия» и его тарифовка

Экспериментальная установка, собранная первоначально для проведения комплекса научных исследований по рассматриваемой тематике, выглядела так, как показано на рисунке 2.34.



1 – контактная машина МТ-3201; 2 – электроды; 3 – свариваемые детали; 4 – ЭВМ; 5 – интерфейс среды LVW 2010; 6 – устройство NI USB 6251; 7 – устройство согласования; 8 – распределительный блок; 9 – источник питания датчика тока; 10 – датчик тока ДТПХ-32000

Рисунок 2.34 – Общий вид экспериментальной установки

Технические характеристики сварочной машины приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики машины МТ-3201

Характеристика	Значение
Номинальная мощность, кВт·А	180
Номинальный сварочный ток, кА	32
Длительный сварочный ток, кА	10
Число ступеней регулирования вторичного напряжения	8
Пределы регулирования вторичного напряжения, В	3,6...6
Полезный вылет машины, мм	500
Максимальное усилие сжатия электродов, Н	20000
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистых сталей, мм	От 0,8 + 0,8 до 5 + 5
Степень защиты	IP 10

Для регистрации сигналов синусоидального переменного напряжения, пропорционального величине сварочного тока при КРС, на нижний электрод машины МТ-3201 с помощью токопроводящей алюминиевой скобы закреплялся датчик, работающий на эффекте Холла (рисунок 2.35, *а*).

Технические характеристики датчика тока представлены в таблице 2.3.

Для питания датчика тока использовался двухполярный источник питания, обеспечивающий напряжение ± 12 В (рисунок 2.35, *б*).

а)



б)

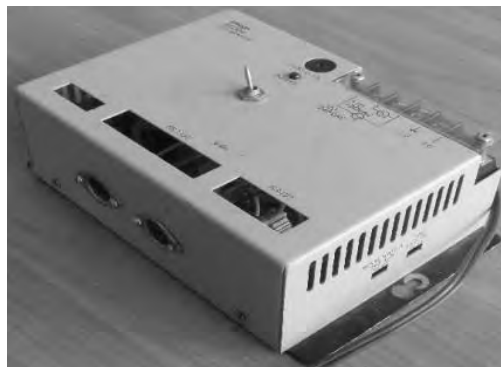


Рисунок 2.35 – Датчик тока ДТПХ-32000 (*а*) и его источник питания (*б*)

Таблица 2.3 – Технические характеристики датчика тока ДТПХ-32000

Характеристика	Значение
Пределы измерения значения тока, кА	0...32
Род тока	Постоянный, переменный, импульсный
Частота импульсов, кГц	0...2,0
Напряжение питания, В	$\pm 12 \pm 0,1$
Выходное напряжение, В при $I = I_{\max}$	$10 \pm 0,5$
Выходное напряжение, В при $I = 0$	$0 \pm 0,3$
Ток потребления, мА, не более	40
Диапазон рабочих температур, °С	От –30 до +85
Погрешность измерения в диапазоне рабочих температур, %	Не более 5
Нелинейность характеристик в диапазоне токов от 100 до 32000 А, %	Не более 2
Основная приведенная погрешность, %	± 1

Принцип работы датчика ДТПХ-32000 заключается в том, что величина регистрируемого им выходного напряжения прямо пропорциональна величине измеряемого тока.

Необходимо отметить, что в рассматриваемой экспериментальной установке датчик можно использовать независимо от формы и частоты сигналов регистрируемого тока.

Главный недостаток такого датчика состоит в том, что выходная электродвижущая сила на его выходе зависит от расположения датчика относительно вторичного контура сварочной машины, а также относительно самих свариваемых деталей. Это принуждает к тарировке датчика каждый раз при его повторной установке на электроды сварочной машины. Значение тока питания датчика, поступающего от соответствующего источника, также необходимо перепроверять, т. к. и его отклонение влияет на величину возникающей электродвижущей силы.

Тарировка датчика ДТПХ-32000 осуществлялась путем включения во вторичный контур сварочной машины пояса Роговского, соединенного с прибором для замера тока, при максимальном токе короткого замыкания электродов (рисунок 2.36).



Рисунок 2.36 – Пояс Роговского и прибор для замера тока конденсаторного типа

Для прямой регистрации сигналов синусоидального переменного напряжения межэлектродной зоны использовался датчик в виде экранированных кабелей, спаянных с электродами в точках максимального приближения к их контактным поверхностям. К верхнему (подвижному) электроду припаивался «информационный» кабель, а к нижнему (неподвижному) – «заземляющий».

Электротехническая распределительная коробка применялась для кабельного соединения датчиков тока и напряжения с входами устройства NI USB 6251.

Для управления работой сварочной машины МТ-3201 использовался регулятор цикла сварки типа РКС-801 в виде отдельного прибора (рисунок 2.37).

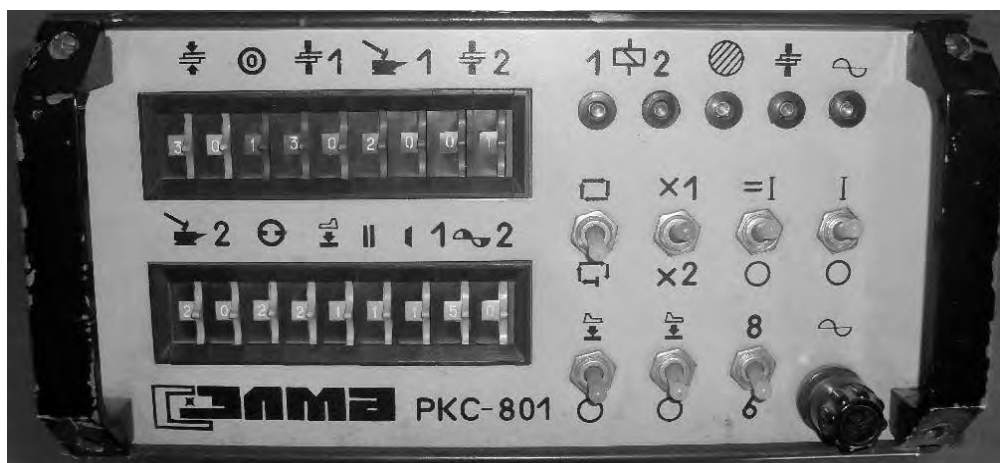


Рисунок 2.37 – Лицевая панель регулятора цикла сварки типа РКС-801

Для соединения регулятора со сварочной машиной был предусмотрен разъем РШАГКУ-20, для возможности воздействия на регулятор со стороны внешних устройств дополнительно – разъем РШАВКУ-14. В соответствии с техпаспортом на регулятор для разъема РШАВКУ-14 диапазон внешних управляющих сигналов лежал в пределах $0...10$ В при токе потребления 15 мА.

Замыкание и размыкание контактов педали сварочной машины использовались с целью запуска процесса КРС и возможности последующего управления им.

Усилие сжатия электродов определялось и контролировалось заранее по таблице его зависимости от давления сжатого воздуха в пневматическом цилиндре привода сжатия, определяемого по манометру машины МТ-3201. Тарировку манометра осуществляли с помощью микрометра CSN 25 1811 (S 60) и динамометра.

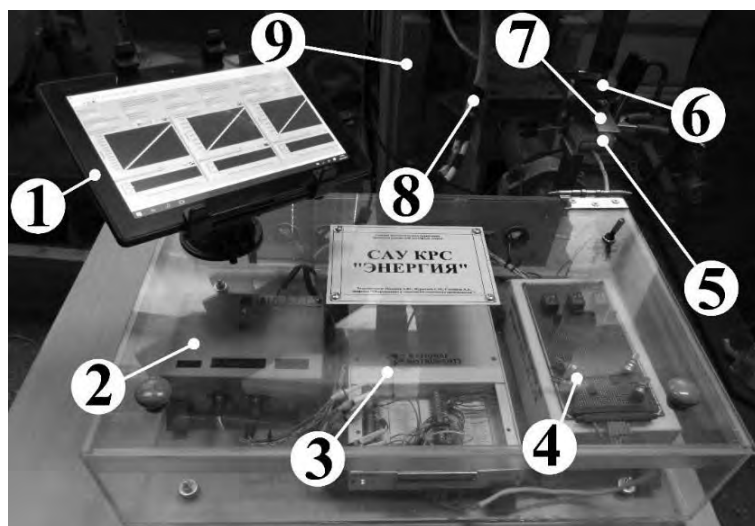
Использование при экспериментах вышеуказанной установки (см. рисунок 2.34) на основе устройства NI USB 6251 и среды графического программирования LVW 2010 позволило значительно повысить точность измерений в сравнении со случаем применения электронно-лучевого осциллографа, когда погрешности определения масштаба записи и величины измеряемых ординат за счет размытости линий осциллограмм могут лежать в пределах $8...15$ %.

Постепенно экспериментальная установка была формализована в виде отдельного прибора с названием «Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки «Энергия» (далее – система САУ КРС «Энергия») и возможностью управления планшетным ПК (рисунок 2.38).

На рисунке 2.38 представлены составные части прибора: 1 – планшетный ПК с программным кодом среды LVW 2010; 2 – источник питания датчика тока; 3 – устройство NI USB 6251; 4 – устройство согласования; 5 – датчик тока

ДТПХ-32000; 6 – электроды для КРС (с увеличенными площадями контактных поверхностей); 7 – свариваемые детали; 8 – кабель управления; 9 – сварочная машина МТ-3201. Специальный тумблер с осветительным диодом на верхней крышке прибора позволяет перед запуском процесса КРС проверить в тестовом режиме работоспособность всех его составных элементов, в том числе и управляющего программного кода среды LVW 2010.

а)



б)

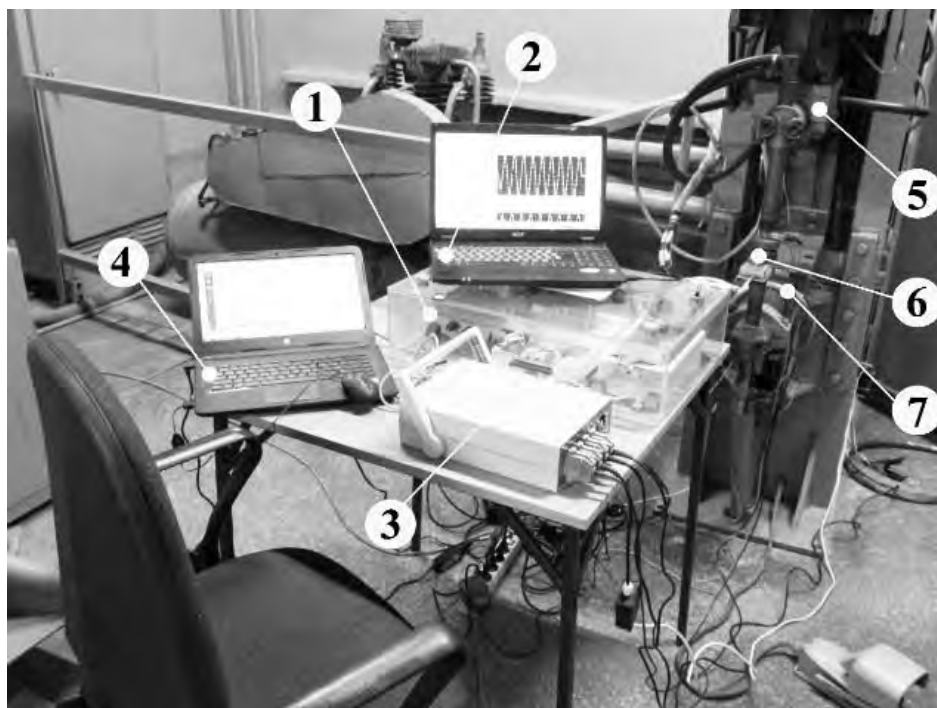


Рисунок 2.38 – Система САУ КРС «Энергия» (а) и ее подключение к сварочной машине (б)

Первоначально в составе САУ КРС «Энергия» отсутствовало устройство, с помощью которого можно было бы в реальном времени адекватно оценить точность системного ввода энергии в межэлектродную зону в процессе управления сварочной машиной. В свою очередь, это очень важно при расчетах энергопотребления контактной машины при сварке на различных режимах. Речь идет о том, что если на первой ступени импульса тока в программном коде среды LVW 2010 в операторе сравнения значений энергии задавалась требуемая энергия, то не было никакой возможности отследить и перепроверить это значение по графику или чату. Это было связано с тем, что при управлении сварочной машиной в реальном времени добавление в программный код любых индикаторных блоков (в виде графиков, чатов, таблиц, числовых индикаторов) затягивало во времени процесс математической обработки сигналов, регистрируемых датчиками. Однако процесс КРС крайне быстротечен и может составлять не более 8...10 периодов. За это время сигналы процесса сварки проходят через устройство NI USB 6251 и USB-кабель, соединяющий его с ЭВМ. На ЭВМ среда LVW 2010 функционирует на базе операционной системы WINDOWS 10. Дополнительную инерционность процессу протекания сигналов в момент выключения тока придает регулятор цикла сварки. В совокупности

общее быстроедействие процесса математического расчета значений энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, зависит от быстрогодействия всех указанных элементов. В таких условиях усложнение программного кода приводит к временной задержке расчета энергии. Оценить величину этой задержки с помощью устройства NI USB 6251 и среды LVW 2010 не представлялось возможным. Таким образом, приходилось «доверять» надежности работы системы САУ КРС «Энергия» по отслеживанию энергии, вводимой в межэлектродную зону.

Для решения вышеуказанной проблемы, а именно для тарировки системы САУ КРС «Энергия», к сварочной машине также был подключен многофункциональный микропроцессорный регистратор сварочных процессов РКДП 0401 (далее – регистратор). Видоизмененная экспериментальная установка стала выглядеть так, как показано на рисунке 2.39.



1 – САУ КРС «Энергия»; 2 – ЭВМ (к САУ КРС «Энергия»); 3 – регистратор; 4 – ЭВМ к регистратору; 5 – сварочная машина МТ-3201; 6 – свариваемые детали; 7 – пояс Роговского к регистратору

Рисунок 2.39 – Модернизированная экспериментальная установка

В данном случае регистратор должен был замерять в процессе КРС синусоидальные сигналы переменного напряжения, пропорционального сварочному току, с помощью пояса Роговского (из комплекта регистратора).

Рассматривался процесс КРС соединений, состоящих из двух пластин толщиной $2 + 2$ мм из низкоуглеродистой стали с одним круглым выштампованным сферическим рельефом на одной из деталей (габариты рельефа $6 \times 1,2$ мм).

Режим КРС для рассматриваемых соединений, рекомендуемый в [1, 4, 45], настраиваемый на регуляторе цикла сварки и принимаемый за базовый ($I_{CB} = 15$ кА; $\tau_{CB} = 0,28$ с; $F_{CB} = 3,6$ кН), был сначала откорректирован. В связи с тем, что при КРС током 15 кА фактическое значение сопротивления межэлектродной зоны в момент выключения тока составляет 75...80 мкОм вместо рекомендуемых 98...105 мкОм, в межэлектродную зону вводится меньшее количество энергии (5,5...5,7 кДж) в сравнении с расчетным (6,2...6,5 кДж по УТБ). Для того чтобы компенсировать недостаток энергии, вводимой в межэлектродную зону, сварочный ток увеличили с 15 до 16 кА. При этом значение энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону, составило 6,5 кДж.

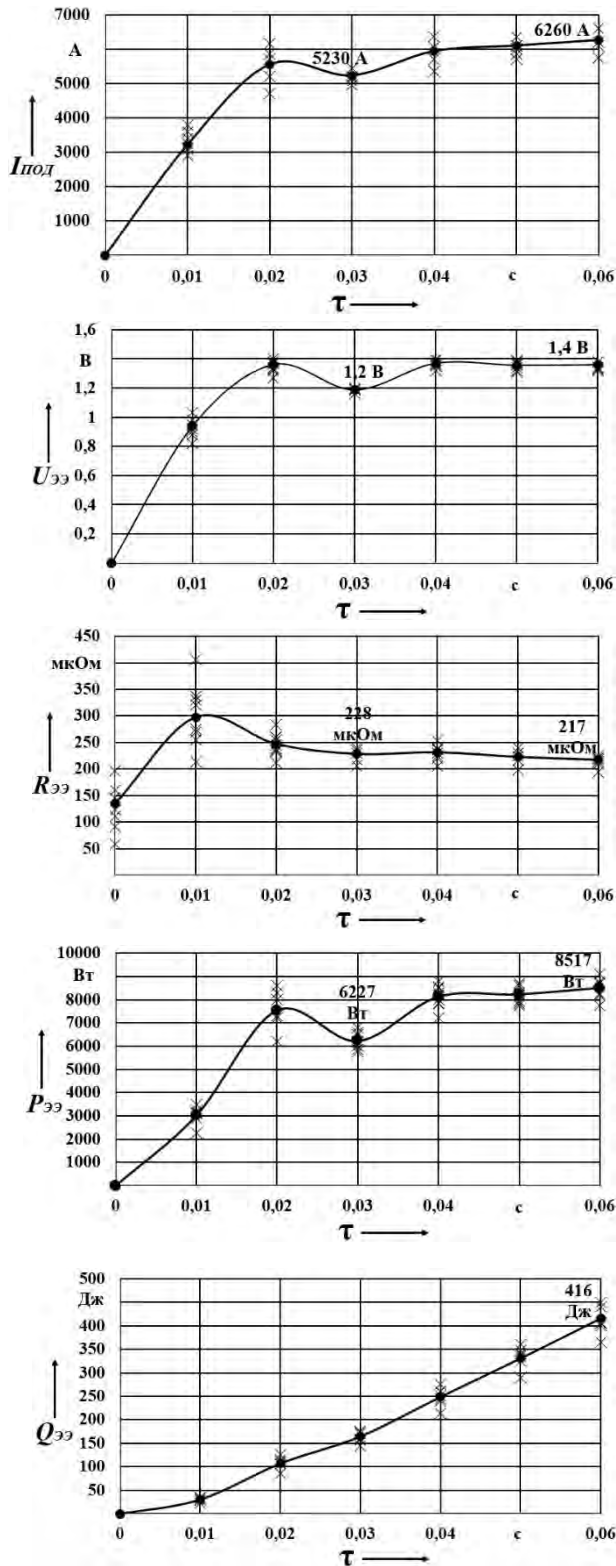
При сварке с использованием системы САУ КРС «Энергия» задавался двухступенчатый импульс тока. В программном коде среды LVW 2010 сигналами постоянного напряжения, равными 0,4 и 0,26 В, задавались ток подогрева $I_{Под} = 7,5$ кА и максимальный (сварочный) ток $I_{CB} = 15$ кА, соответствующие базовому режиму КРС до корректировки. На каждом режиме сваривалось по девять однотипных соединений, длительность выдержки деталей в сжатом состоянии после выключения тока составляла 1,2 с.

Сначала с помощью регистратора была установлена минимальная длительность протекания токов подогрева и сварки, которую может обеспечить система САУ КРС «Энергия» при задании двухступенчатого импульса: $\tau_1 = \tau_2 = 60$ мс. Таким образом, даже при исходном задании в среде LVW 2010 требуемых значений энергии, необходимых для двухэтапного ввода в межэлектродную зону и условно равных $1 + 1$ Дж, фактически система будет вводить в межэлектродную зону конкретную энергию в соответствии с вышеуказанными значениями τ_1 и τ_2 .

После этого системой САУ КРС «Энергия» в режиме обычной регистрации сигналов (без последующего управления сварочной машиной) определили количество энергии, вводимое в межэлектродную зону на соответствующих токах за вышеуказанное время. Для этого на регуляторе установили длительность протекания тока, равную трем периодам, и осуществили сварку образцов на токе $I_{Под} = 7,5$ кА, регистрируя сигналы процесса с помощью системы САУ КРС «Энергия» (ток $I_{Под}$, напряжение $U_{ЭЭ}$, сопротивление $R_{ЭЭ}$, мощность $P_{ЭЭ}$, энергия $Q_{ЭЭ}$ межэлектродной зоны). Затем с этими же образцами процедуру повторили для длительности протекания тока, равной пяти периодам, и на токе $I_{CB} = 15$ кА. После этого кривые совместили и аппроксимировали (рисунок 2.40).



а)



б)

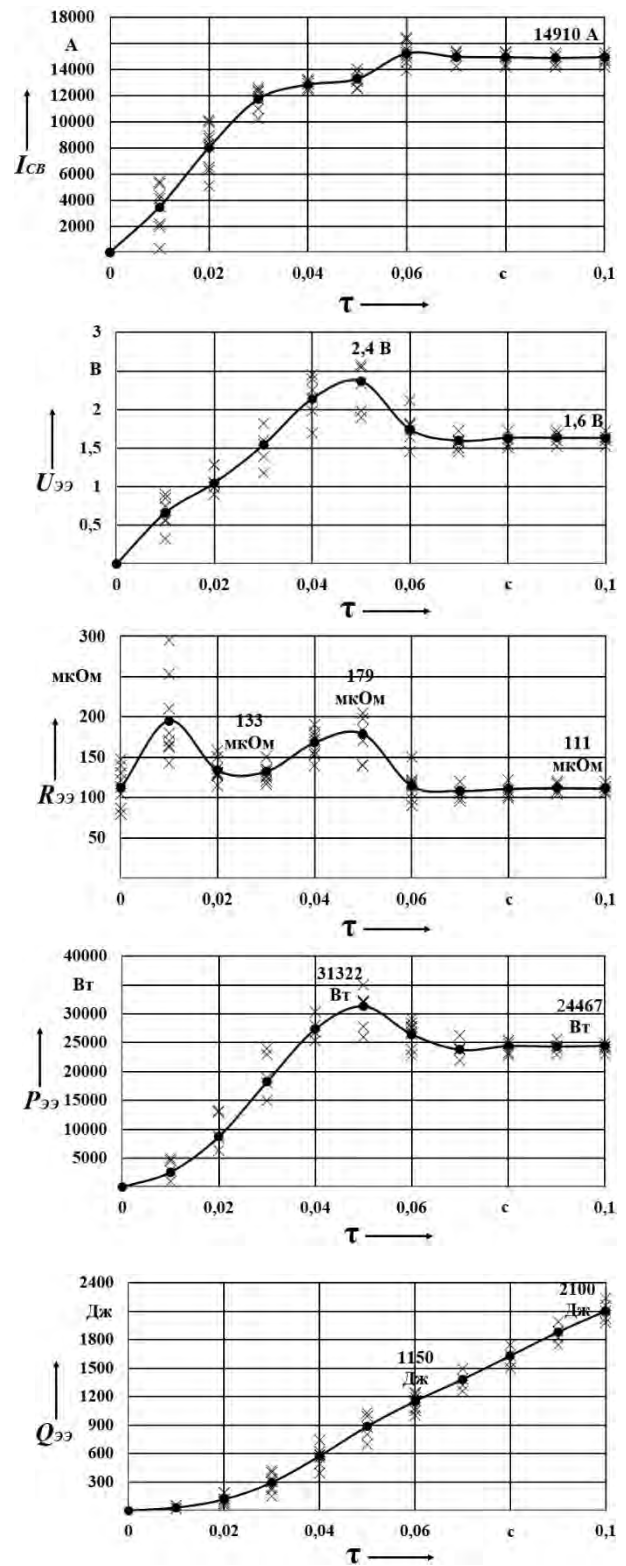


Рисунок 2.40 – Электрические параметры процесса КРС на токе подогрева (а) и максимальном токе (б) для определения возможного минимума энергии, вводимой в межэлектродную зону посредством САУ КРС «Энергия»

В результате было установлено, что за минимально возможное время, равное 120 мс (по 60 мс на токе подогрева и максимальном токе), двумя отдельными импульсами САУ КРС «Энергия» позволяет ввести в межэлектродную зону $Q_{\text{ЭЭ}}$ в количестве около 430 Дж при $I_{\text{Под}}$, около 1160 Дж при $I_{\text{СВ}}$ [137].

При КРС непрерывным двухступенчатым импульсом за первый период нарастания тока на второй ступени импульса $R_{\text{ЭЭ}}$ уменьшается с 215...220 до 130...140 мкОм (после подогрева). $U_{\text{ЭЭ}}$ в этот момент составляет около 1,25 В. Ток успевает достичь 9,5...9,6 кА. Поэтому за это время в межэлектродную зону вводится 180...200 Дж вместо 120...130 Дж (рисунок 2.40, б).

Таким образом, в данном эксперименте в сравнении с базовым режимом сварки (6,5 кДж) количество $Q_{\text{ЭЭ}}$, вводимое в межэлектродную зону системой САУ КРС «Энергия» при двухступенчатом импульсе тока (1,67 кДж), было уменьшено примерно в 3,9 раза.

При этом необходимо отметить, что при задаваемом токе подогрева 7,5 кА за время 60 мс он успевает достичь значения 6,2...6,3 кА, что обусловлено нарастающим характером импульса до максимального значения. Максимальный ток достигает за это же время 14,9...15 кА при задаваемом $I_{\text{СВ}} = 15$ кА.

Относительная стабилизация сопротивления межэлектродной зоны в обоих случаях происходит уже через 1...1,5 периода после включения тока. Величина $R_{\text{ЭЭ}}$ в момент выключения тока составляет 215...220 и 110...115 мкОм при токах $I_{\text{Под}}$ и $I_{\text{СВ}}$ соответственно.

В связи с нарастающим характером импульса тока и динамично изменяющейся площадью S_K контакта деталь–деталь $Q_{\text{ЭЭ}}$ вводится в межэлектродную зону неравномерно. Если разбить первые 60 мс длительности протекания тока на равные интервалы, а также совместить кривые изменения $R_{\text{ЭЭ}}$ во времени, то размерный ряд для ввода $Q_{\text{ЭЭ}}$ в межэлектродную зону при двухступенчатом импульсе тока (для САУ КРС «Энергия») будет иметь следующий вид (рисунок 2.41, а).

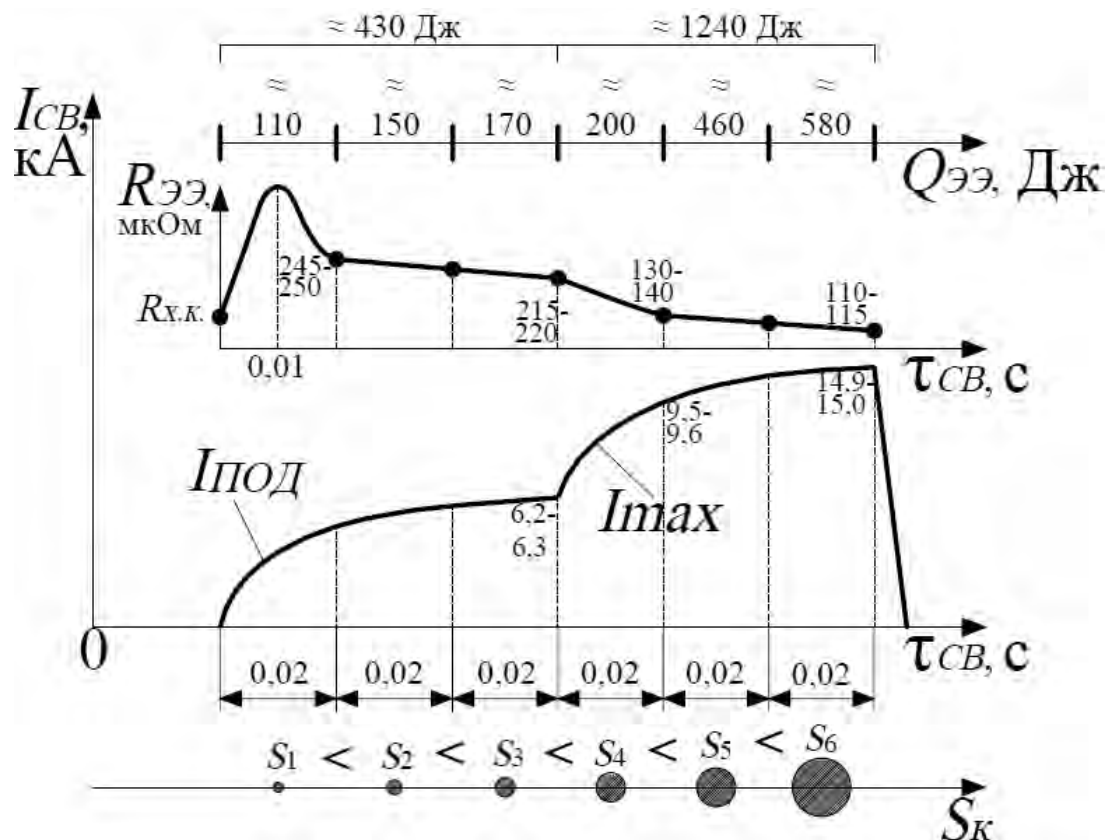
Размерный ряд ввода $Q_{\text{ЭЭ}}$ в межэлектродную зону при базовом режиме КРС представлен на рисунке 2.41, б (I_{max} – максимальный ток; S_K – площадь контакта деталь–деталь; $R_{\text{Х.К.}}$ – холодное сопротивление контактов межэлектродной зоны).

Для процесса КРС на базовом режиме характерна относительная стабилизация $R_{\text{ЭЭ}}$ уже через три периода после включения тока. На протяжении оставшегося времени вплоть до момента выключения тока S_K увеличивается незначительно ($R_{\text{ЭЭ}}$ уменьшается с 110...115 до 75...80 мкОм).

Это свидетельствует о преждевременной деформации рельефа на начальном этапе процесса, дальнейшем неэффективном вводе тепла в межэлектродную зону (повышенный теплоотвод в основной металл и в электроды).



а)



б)

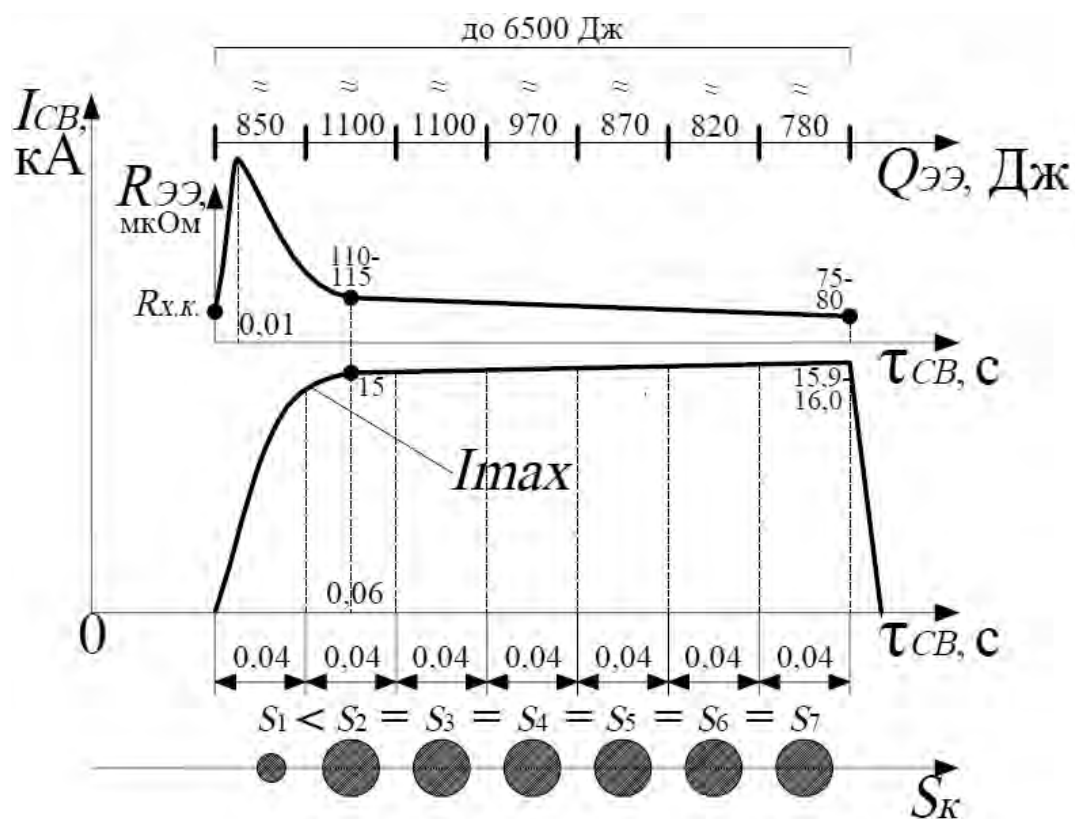


Рисунок 2.41 – Характер ввода $Q_{\text{ээ}}$ в межэлектродную зону при КРС с системой управления (а) и на базовом режиме (б) (только для рассматриваемых токов)

Характер ввода $Q_{\Sigma\Sigma}$ в межэлектродную зону на максимальном токе в двух рассматриваемых случаях различен. При КРС на базовом режиме после начального роста до 540...550 Дж за каждые 0,02 с после шести периодов сварки $\Delta Q_{\Sigma\Sigma}$ плавно уменьшается до 390...400 Дж (за период) и далее почти не изменяется, т. к. значение $R_{\Sigma\Sigma}$ приближается к своему минимуму. При сварке двухступенчатым импульсом (с САУ КРС «Энергия») на максимальном токе в первые 60 мс за каждый период $\Delta Q_{\Sigma\Sigma}$ нарастает по аналогии с КРС на базовом режиме. Однако в этот момент времени $R_{\Sigma\Sigma}$ выше, чем на базовом режиме, и составляет около 110...115 мкОм. Таким образом, при разнице максимальных токов в 1 кА этого достаточно для ввода в межэлектродную зону большего количества $Q_{\Sigma\Sigma}$ (580 Дж за период).

Это объясняется более плавным снижением $R_{\Sigma\Sigma}$ на протяжении всего процесса сварки, а также большими значениями $R_{\Sigma\Sigma}$ в связи со значительно меньшей эффективной площадью контакта деталь–деталь (в виде кольца) в сравнении с базовым режимом (в виде окружности). В данном случае под «эффективной площадью» понимается площадь, по которой происходит наиболее интенсивный разогрев металла. Дальнейшее пропускание максимального тока на второй ступени импульса приводит к снижению $\Delta Q_{\Sigma\Sigma}$ примерно до 450 Дж в каждом периоде (см. рисунок 2.41, б).

Таким образом, на основании вышеприведенных исследований можно сделать следующие выводы по второму разделу монографии.

1 Выделены основные проблемы известных систем, реализующих внешнее воздействие на процесс управления основными параметрами режима КРС и КТС.

1.1 Неспособность регулируемого поэтапного дозированного ввода расчетной энергии (по уравнению теплового баланса) в межэлектродную зону.

1.2 Низкая информативность входных параметров контроля, на анализе которых основана оценка качества формируемых сварных соединений.

1.3 Применимость многих систем лишь к определенным толщинам или материалам свариваемых деталей.

1.4 Недостаточное быстроедействие при необходимости внешней корректировки основных параметров режима сварки в реальном времени.

1.5 Влияние изменений значений параметров вторичного контура контактной машины на процесс регистрации и корректировки основных параметров режима сварки.

1.6 Невозможность игнорирования первоначальных настроек регулятора цикла сварки для их корректировки в режиме реального времени.

1.7 Неучет особенностей кинетики формирования сварного соединения при деформировании металла свариваемых деталей в межэлектродной зоне.

1.8 Неучет влияния величины усилия сжатия электродов и инерционности привода контактной машины на процесс введения энергии в межэлектродную



зону, что приводит к колебаниям величины электроэнергии, потребляемой контактной машиной при сварке отдельных точек.

2 Предложен и запатентован способ КРС, заключающийся в поэтапном дозированном введении энергии в межэлектродную зону путем задания многоступенчатых импульсов тока.

3 Разработана, запатентована и формализована в виде отдельного прибора система автоматического управления процессом КРС (САУ КРС «Энергия») на базе аналого-цифрового устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS и среды графического программирования LABVIEW (язык программирования «G»), позволяющая реализовать вышеуказанный способ на практике.

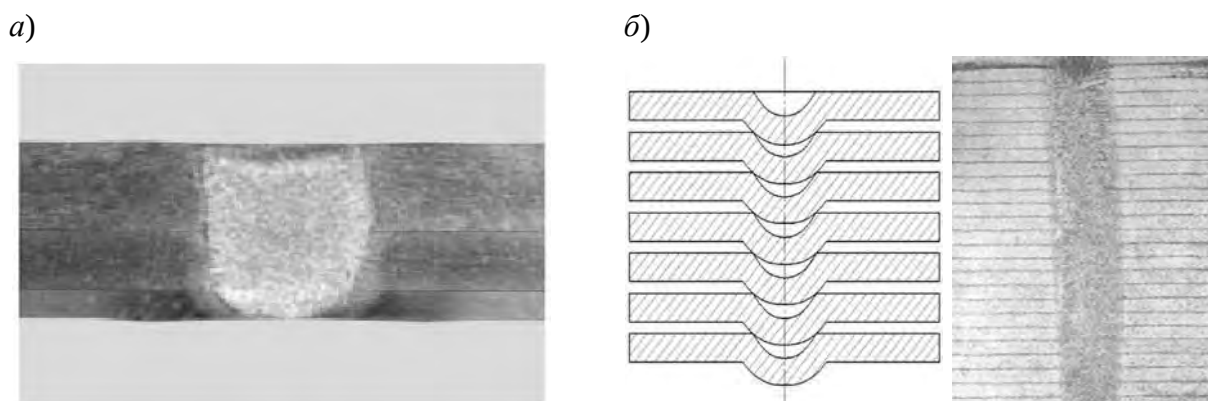
4 В среде LABVIEW создан графический программный код, обеспечивающий необходимую последовательность действий в ходе автоматического управления процессом КРС в реальном времени посредством вышеуказанной системы в соответствии с предложенным способом.

3 Анализ энергетических показателей процесса КРС с пониженной энергоемкостью

3.1 Пакетные соединения как объект для проведения первых экспериментальных исследований процесса КРС с регулируемым вводом энергии в межэлектродную зону

Разработка системы САУ КРС «Энергия» привела к тому, что появившаяся для процесса КРС возможность поэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону различными токами вызвала необходимость определения комбинаций «задаваемый ток – вводимая часть от расчетной энергии», наиболее приемлемых для сварки конкретных соединений. Также принципиальным стало определение количества ступеней импульса тока для осуществления вышеуказанного процесса сварки. Однако для этого необходимо было предварительно изучить характер деформирования рельефов в процессе КРС на примере соединений, для получения которых установление основных этапов кинетики их формирования должно сыграть решающую роль при разработке наиболее энергоэффективных основных параметров режима сварки.

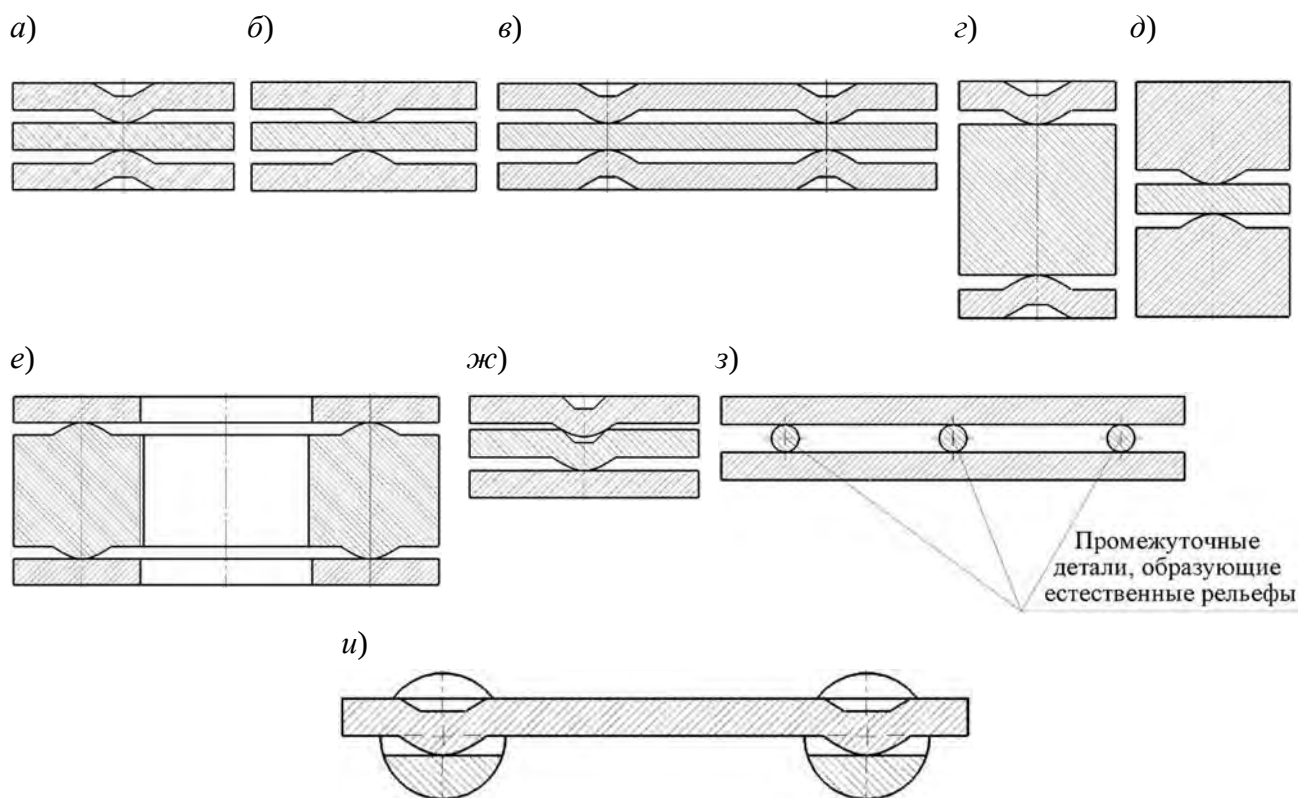
Рассматривался процесс КРС пакетных (многослойных, ступенчатых) соединений. Данные соединения широко применяются при производстве замочно-скобяных и арматурных изделий, пакетов из низкоуглеродистых и электротехнических сталей, алюминия, а также тонколистовых и микросварных соединений проводов и кабелей (рисунок 3.1).



а – пакетное соединение деталей двигателя автомобиля «Hyundai Equus» (сплав АМг3);
б – схема и макрошлиф пакетного соединения пластин магнитопровода сварочного трансформатора (электротехническая сталь)

Рисунок 3.1 – Пакетные соединения

Схемы применяемых пакетных рельефных соединений представлены на рисунке 3.2 [4, 7, 138].



а – выштампованный рельеф + пластина + выштампованный рельеф; б – высаженный рельеф + пластина + высаженный рельеф; в – сварка несколькими рельефами; г – пластина с рельефом + стержень + пластина с рельефом; д – стержень с рельефом + пластина + стержень с рельефом; е – сварка кольцевым рельефом; ж – рельеф в рельеф + пластина; з – пластина из одного материала + промежуточные детали, образующие естественные рельефы + пластина из другого материала; и – пластина с рельефами + срезанный стержень + срезанный стержень

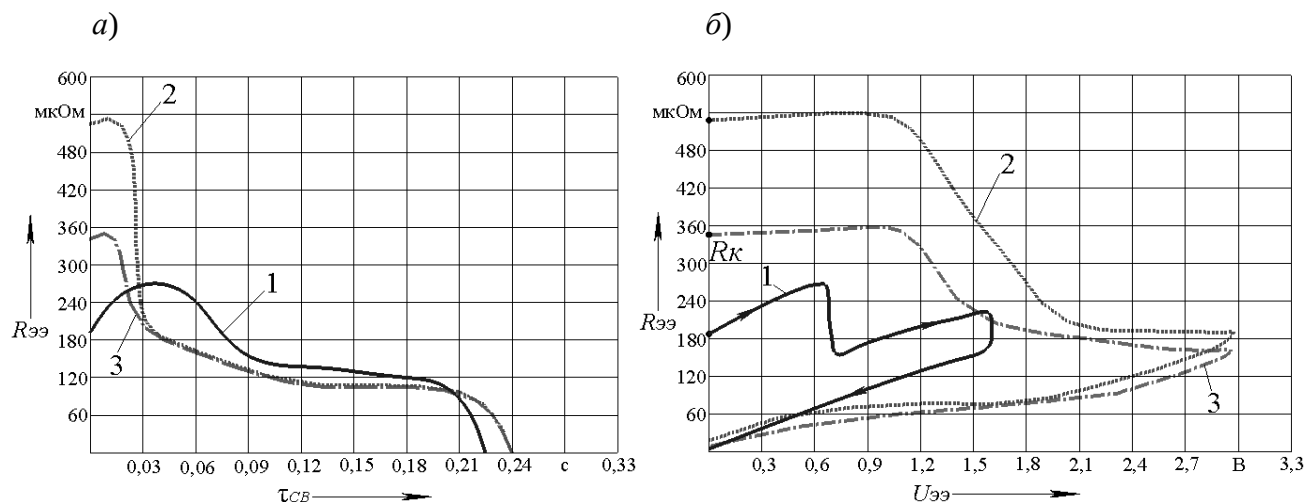
Рисунок 3.2 – Схемы пакетных соединений

Основными заводскими способами получения таких соединений традиционно являются КТС, точечная и рельефная конденсаторная сварка, холодная сварка и штамповка, дуговые способы сварки.

Фактически процесс сварки пакетных соединений характеризуется определенными отличительными особенностями в сравнении со сваркой за один цикл соединений, состоящих из двух деталей:

- перед пропуском через свариваемые детали тока сопротивление межэлектродной зоны $R_{\text{ээ}}$ изначально повышено в 1,5...2 раза из-за увеличенного количества собственных сопротивлений деталей, сопротивлений контактов деталь–деталь и электрод–деталь;
- существенно повышена вероятность шунтирования линий протекания сварочного тока через участки металла деталей, не сжимаемые сварочными электродами при сварке.

Это приводит к тому, что характер изменения параметра $R_{\text{ЭЭ}}$ во времени $\tau_{\text{СВ}}$, а также $R-U$ (характеристики межэлектродной зоны) существенно видоизменяются (рисунок 3.3) [139].



Кривая 1 – для соединения из двух деталей; кривая 2 – для соединения из трех деталей при $F_{\text{СВ}} = 8 \text{ кН}$; кривая 3 – для соединения из трех деталей при $F_{\text{СВ}} = 12 \text{ кН}$

Рисунок 3.3 – Зависимости $R_{\text{ЭЭ}} = f(\tau_{\text{СВ}})$ (а) и $R_{\text{ЭЭ}} = f(U_{\text{ЭЭ}})$ (б) при КРС двух деталей толщиной 2 + 2 мм и пакетного соединения толщиной 2 + 2 + 2 мм (данные экспериментальной сварки для сравнения)

Кроме этого, в литературе по сварке давлением для сварки за один цикл соединений, состоящих из трех и более деталей различных толщин и материалов, почти отсутствуют рекомендации таких основных параметров режима, как длительность протекания сварочного тока и его величина, а также усилие сжатия электродов.

В производственных условиях, помимо наличия общеизвестных воздействий, возмущающих межэлектродную зону, при КРС имеют место следующие негативные факторы:

– неправильный выбор основных параметров режима и циклограммы процесса КРС для конкретного типа соединения путем проведения аналогий с режимами, предназначенными для КРС или КТС соединений, состоящих из двух деталей;

- ненадлежащая периодическая зачистка электродов;
- плохая подготовка поверхностей деталей перед сваркой.

На заводе в начале рабочей смены оператор контактной машины изначально задает не точный, а приближенный режим сварки, в результате чего в отдельных циклах КРС появляется повышенная склонность к образованию выплесков, пор и прожогов (при перегреве) (см. рисунок 1.23), а также непроваров и формированию соединений в твердой фазе (при увеличенном теплоотводе из зоны сварки) (рисунок 3.4). Расход электроэнергии при этом чаще всего завышается,

т. к. заранее устанавливается оператором «с запасом», что крайне нежелательно в условиях крупносерийного и массового производства.

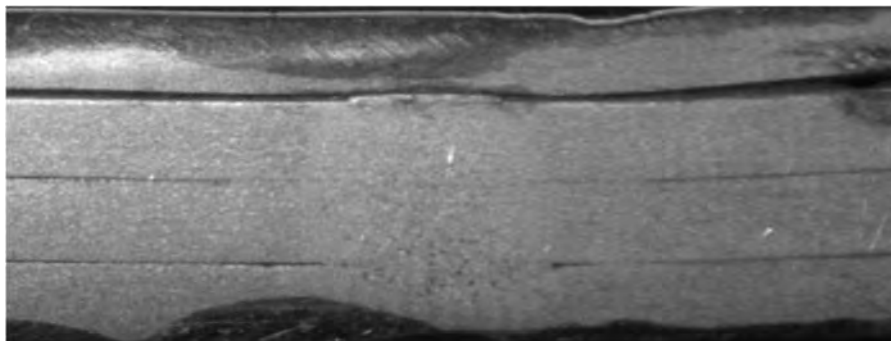


Рисунок 3.4 – Непровар пакетного рельефного сварного соединения при заниженном тепловложении в межэлектродную зону

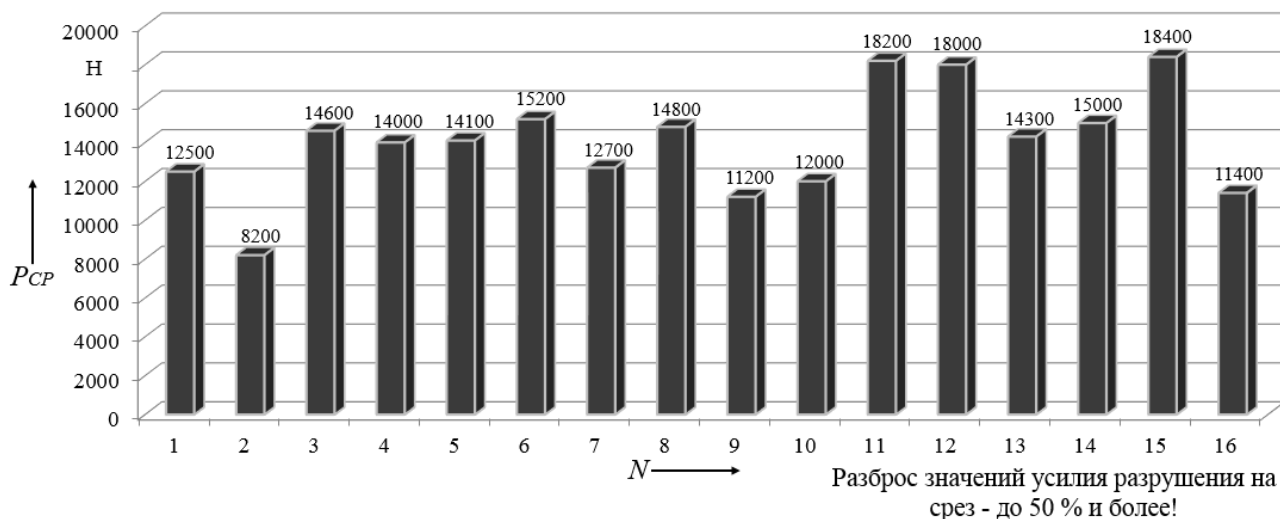
Данные причины приводят к нестабильному введению энергии в зону КРС, повышенным тепловым потерям, что в конечном счете негативно сказывается на формировании литых зон требуемых размеров и формы.

В таких условиях обеспечить стабильные качество и прочность пакетных рельефных сварных соединений крайне сложно.

Для сравнения – на рисунке 3.5 экспериментально полученная статистика прочностных испытаний точечных пакетных соединений из трех деталей из низкоуглеродистой стали толщиной $2,5 + 2,5 + 2,5$ мм, сваренных на режиме, «подбираемом» операторами контактных машин по рекомендациям из источников литературы для КТС схожей суммарной толщины, но при сварке соединений, состоящих из двух деталей толщиной $3,5 + 3,5$ мм [1], свидетельствует об отсутствии стабильности процесса введения энергии в межэлектродную зону, что в итоге сказывается на прочности формируемых пакетных соединений [51].

Следует отметить, что независимо от количества деталей пакетного соединения КРС стараются производить «за один цикл». Но на производстве в ряде случаев геометрические особенности взаимного расположения деталей относительно друг друга не позволяют осуществить сварку «за один цикл» по причине отсутствия достаточной информации об особенностях протекания подобного технологического процесса сварки, о рекомендуемых оптимальных параметрах режима сварки, об особом воздействии на зону сварки возмущающих воздействий.

В целом, исследованиями процесса КРС пакетных соединений ранее занимались В. А. Гилевич [4], М. Липа и Я. Голасек [7], А. И. Гуляев [45], Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров [140], А. А. Чакалев, П. Л. Чулошников [54] и др.



N – номер испытания

Рисунок 3.5 – Диаграмма прочностных испытаний точечных пакетных соединений

Причем В. А. Гилевич, М. Липа и Я. Голасек предлагали сваривать пакетные соединения способом КРС по схемам «плоская деталь + стержень + плоская деталь», «стержень + плоская деталь + стержень», а также пакеты из трех и более плоских деталей, пакеты из трех и более стержней. Это объяснялось широкой распространенностью данных соединений на заводах по производству железобетонных конструкций, трансформаторов и трансформаторных подстанций, а также электротехнических заготовок.

В свою очередь, А. И. Гуляев, Г. А. Николаев, С. А. Куркин и В. А. Винокуров выражали сомнения в возможности осуществления качественной КРС пакетных соединений ввиду особенностей геометрии сварных соединений, условий протекания сварочного тока через заготовки, направлений и величин распределяющейся теплоты в зоне сварки.

Однако однозначного подтверждения тех или иных предположений относительно КРС пакетных соединений на практике или опытным путем получено не было.

Существовали опытные данные ВНИИЭСО по применению КТС для тройных толщин листов из материала сталь Ст 3 толщиной 20 + 20 + 20 мм. При сварке по циклу без подогрева использовались следующие режимы: $I_{CB} = 52...71$ кА; $F_{CB} = 100...125$ кН; $\tau_{CB} = 15...20$ с. Диаметр сварных точек составлял $d_{\text{Я}} = 33...50$ мм [125].

Кроме того, в 1975 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона исследовалась КРС многослойных пакетов листов из электротехнических сталей при производстве деталей трансформаторных подстанций [8]. Исследования носили практический прикладной характер и заключались в экспериментальном подборе оптимальных параметров режима КРС указанных соединений.

Имеются данные об исследовании процесса КТС пакетов из легированной стали 12Х18Н10Т на кафедре сварки Пермского государственного технического университета [141].

Рекомендуемые режимы КТС трех деталей из низкоуглеродистой стали большой толщины (6 + 12 + 6 мм, 8 + 16 + 8 мм, 10 + 20 + 30 мм) приведены также в [142].

Из относительно недавних 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 пакетного соединения по схеме с последовательным образованием литых зон (см. рисунок 1.3, а) [143].

Однако в зарубежных источниках литературы отсутствует информация об исследовании КРС пакетных соединений, состоящих из различного количества деталей из низкоуглеродистой и низколегированной стали разных толщин и материалов, а в литературе стран СНГ данный вопрос подробно не описан.

Сегодня только в Беларуси более чем на 20 заводах по производству железобетона существует необходимость качественной сварки пакетных соединений арматуры, откидных болтов для арматурной сетки и др., т. к. ныне действующие заводские способы и техпроцессы сварки подобных соединений не позволяют получать стабильно прочные бездефектные конкурентоспособные изделия. Основываясь на общепризнанном факте, что рельефные соединения двух заготовок уже на начальных стадиях формирования имеют значительно большую прочность по сравнению с точечными, можно с уверенностью утверждать, что пакетное рельефное соединение должно быть более прочным по сравнению с пакетным точечным. При этом полного проплавления деталей свариваемого пакета при КРС может и не требоваться [4].

3.2 Разработка методики расчета требуемой длительности протекания сварочного тока и его величины для КРС пакетных нахлесточных соединений

Простейшим случаем является КРС пакетного соединения, состоящего из трех пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 + 2 мм с тремя круглыми выштампованными рельефами на наружных пластинах.

Для такой толщины холоднокатаного листа фактический размер рельефов после процесса прессовой штамповки составляет приблизительно (4,75...6) × 1,2 мм (диаметр рельефа × высота рельефа). Он, в свою очередь, определяется размерами матрицы и пуансона из стандартов (рисунок 3.6).



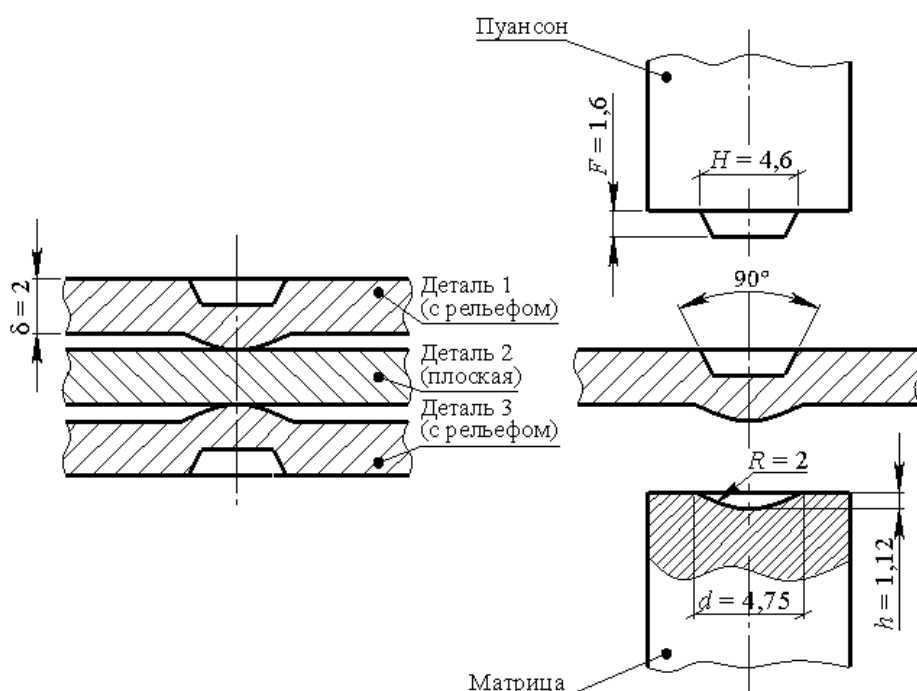


Рисунок 3.6 – Геометрические характеристики матрицы и пуансона для штамповки одного круглого сферического рельефа на холоднокатаном листе толщиной 2 мм (Международный институт сварки)

Внешний вид матриц и пуансонов, изготовленных специально для штамповки рельефов, представлен на рисунке 3.7. Штамповка рельефов производилась на универсальной испытательной машине МУП-50, которая обладает следующими характеристиками:

- предельная нагрузка – 500000 Н;
- цена наименьшего деления шкалы – 20 Н;
- наибольшая погрешность измерения – $\pm 1\%$.



Рисунок 3.7 – Пуансоны с матрицами (а), испытательная машина (б) и штампованные образцы размером 70 × 70 мм (в)

Основания-базы под матрицы и пуансоны (по одной для пуансонов и матриц) изготавливались из низкоуглеродистой стали Ст 3, а сами матрицы и пуансоны – из штамповой стали 45Х. После изготовления матрицы и пуансоны

подвергались закалке в масле при температуре 840 °С и отпуску в воде при температуре 520 °С, после чего их твердость составляла 229 НВ.

Для осуществления процесса КРС рассматриваемых пакетных нахлесточных соединений было необходимо наличие рекомендаций трех основных параметров режима сварки: величины сварочного тока I_{CB} , длительности его протекания τ_{CB} , усилия сжатия электродов F_{CB} .

Так как данные рекомендации в литературе по сварке давлением фактически отсутствовали, то было принято решение разработать методику расчета параметров τ_{CB} и I_{CB} , после чего экспериментально оптимизировать значения параметра F_{CB} (для соответствующих расчетных значений параметров τ_{CB} и I_{CB}).

Так как при сварке пакетных соединений количество деталей, свариваемых за один цикл, может составлять 3...5 шт. и более, было предложено воспользоваться идеей применения критерия технологического подобия при разработке методики расчета вышеуказанных параметров режима КРС.

К процессу КТС применять критерий технологического подобия (далее – критерий КТП) ранее предложил К. А. Кочергин. Согласно [125], для диаметров литых ядер d_J от 3 до 40 мм критерий КТП связывает между собой основные параметры режима КТС, геометрию формируемой сварной точки и характеристики металла свариваемых деталей:

$$K = \frac{Q_{CT}}{Q_M} = \frac{I_{CB}^2 \rho_T h_J \sqrt{\tau_{CB} \sigma_T}}{d_J T_{пл} \sqrt{\lambda_M \gamma_M c_M \delta F_{CB}}}, \quad (3.1)$$

где h_J – высота литого ядра;

δ – толщина одной детали;

ρ_T – удельное электросопротивление материала деталей;

λ_M – теплопроводность материала деталей;

γ_M – плотность материала деталей;

c_M – удельная теплоемкость материала деталей;

σ_T – предел текучести материала деталей;

$T_{пл}$ – температура плавления материала деталей.

Для константы $T_{пл} \sqrt{\lambda_M \gamma_M c_M}$ единицы измерения Дж/(м²К√с). Размерности остальных величин: I_{CB} – А; ρ_T – Ом·м; d_J , h_J и δ – м; τ_{CB} – с; λ_M – Вт/(м·К); γ_M – кг/м³; c_M – Дж/(кг·К); F_{CB} – Н; $T_{пл}$ – К; σ_T – Н/м².

Принцип подобия заключается в том, что два процесса должны быть подобными, если у них есть некая общая количественная характеристика, описывающая эти процессы и одинаковая для них обоих. Для процесса КТС, в понимании К. А. Кочергина, такой характеристикой являлось отношение энергии, затрачиваемой на нагрев и плавление центрального столбика металла,

к энергии тепловых потерь (критерий КТП). Соответственно, он сделал следующий вывод: если допустить, что для каких-либо деталей хорошо отработан оптимальный режим, характеризуемый определенным значением критерия КТП, то это же значение критерия КТП определит оптимальные режимные показатели для других деталей, различающихся по толщине. Это предположение, в свою очередь, подтвердилось экспериментальными исследованиями и теоретическим расчетом режимов КТС соединений, состоящих из двух деталей из низкоуглеродистой стали, а также из титана, дюралюминия и стали 12Х18Н10Т. При этом было установлено, что значения критерия КТП для всех металлов могут лежать в пределах от 25 до 60 [125].

При этом фактически не существовало формул расчета критерия КТП для процессов КРС и КТС пакетных соединений, которые позволили бы достаточно быстро и точно рассчитать требуемые значения параметров τ_{CB} и I_{CB} при изменении количества свариваемых деталей пакета и их материала. В [125] лишь предполагается, что по физическому смыслу критерия КТП для КТС соединения, состоящего из трех равнотолщинных листов, его значение должно быть в 1,33 раза больше, чем для сварки соединения, состоящего из двух таких же листов. По этой причине для расчета данных параметров применительно к процессу КРС пакетных нахлесточных соединений была разработана методика на основе УТБ.

В данном случае, как и по Кочергину, в качестве критерия КТП для процесса КРС было предложено использовать отношение полезной энергии, затрачиваемой на непосредственное формирование зоны взаимного расплавления металла, к энергии тепловых потерь. Однако расчетные формулы для определения составляющих энергии, вводимой в межэлектродную зону при КРС, было принято заимствовать из УТБ, но после их первоначальной корректировки под специфику геометрии пакетных соединений.

Для этого составлялась расчетная схема УТБ для процесса КРС пакетного нахлесточного соединения трех пластин из низкоуглеродистой стали толщиной $2 + 2 + 2$ мм по одному круглому выштампованному сферическому рельефу габаритами $4,75 \times 1,2$ мм, расположенному на каждой из наружных деталей пакета (рисунок 3.8).

При этом относительно распределения температурного поля в свариваемых деталях были приняты два следующих допущения:

1) подавляющую часть тепловыделения в центральной детали составляет тепловыделение, распространяющееся от мест ее контактирования с рельефами наружных деталей;

2) столбик металла центральной детали достигает температуры, близкой к температуре плавления, благодаря концентрации линий протекания сварочного тока по площадям ее контактов с рельефами наружных деталей, а также ввиду



интенсивной деформации с перемешиванием металла рельефов и металла центральной детали.

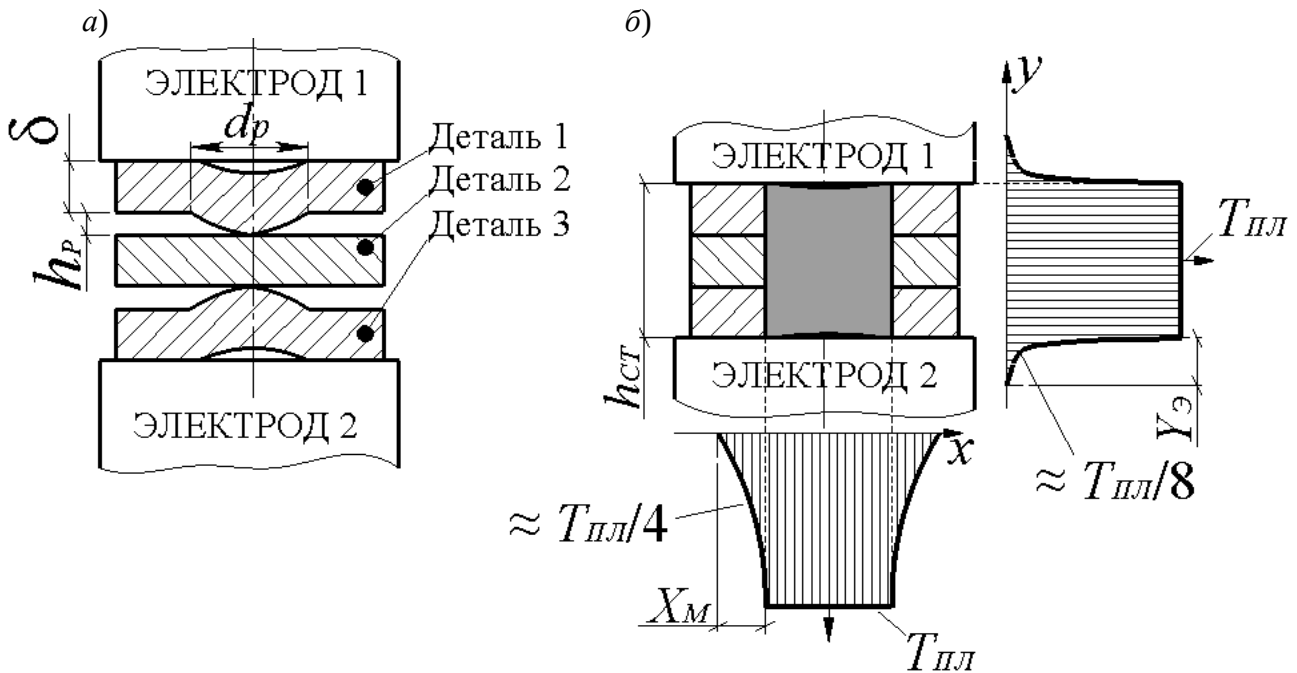


Рисунок 3.8 – Геометрия пакетного соединения трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм перед КРС (а) и расчетная схема УТБ (б)

На основании этого при расчете УТБ предполагалось, что необходимо и достаточно рассчитывать энергию, вводимую в два столбика металла, общих для центральной и наружных деталей. Поэтому расчет составляющих УТБ производился для двух столбиков металла с объединением их в один.

Далее корректировались формулы (1.1)–(1.4) для расчета составляющих энергии, вводимой в межэлектродную зону при КРС [136]:

$$Q_{II} = 0,25\pi d_p^2 n \delta c_M \gamma_M T_{II}; \quad (3.2)$$

$$Q_M = n \delta K_1 \pi \sqrt{a_M \tau_{CB}} (d_p + 4 \sqrt{a_M \tau_{CB}}) c_M \gamma_M T_{II}; \quad (3.3)$$

$$Q_{\Delta} = 0,25 K_2 \pi d_{\Delta-D}^2 \sqrt{a_{\Delta} \tau_{CB}} c_{\Delta} \gamma_{\Delta} T_{II}, \quad (3.4)$$

где n – количество свариваемых деталей пакета одинаковой толщины;
 $d_{\Delta-D}$ – диаметр контакта плоский электрод–деталь.

Затем для процесса КРС трех однотолщинных пластин по трем параметрам рельефов одновременно определялся критерий КТП как соответствующее отношение составляющих энергии, вводимой в межэлектродную зону ($Q_M + Q_{\Delta} = Q_{пот}$ – энергия тепловых потерь):

$$K = \frac{Q_{II}}{Q_M + Q_{\Xi}} = [3(0,25\pi d_P^2 n \delta c_M \gamma_M T_{ПЛ})] /$$

$$/ [(3n\delta K_1 \pi \sqrt{a_M \tau_{CB}} (d_P + 4\sqrt{a_M \tau_{CB}}) c_M \gamma_M T_{ПЛ}) +$$

$$+ (0,25K_2 \pi d_{\Xi-Д}^2 \sqrt{a_{\Xi} \tau_{CB}} c_{\Xi} \gamma_{\Xi} T_{ПЛ})]; . \quad (3.5)$$

Таким образом, формула расчета критерия КТП приняла вид:

$$K = \frac{0,75d_P^2 n \delta c_M \gamma_M}{(3n\delta K_1 \sqrt{a_M \tau_{CB}} (d_P + 4\sqrt{a_M \tau_{CB}}) c_M \gamma_M) + (0,25K_2 d_{\Xi-Д}^2 \sqrt{a_{\Xi} \tau_{CB}} c_{\Xi} \gamma_{\Xi})}. \quad (3.6)$$

Далее в формулу (3.6) подставлялись известные теплофизические и геометрические характеристики свариваемых деталей пакета (для низкоуглеродистой стали), а также материала электродов (бронза БрБ2): $\delta = 0,2$ см; $d_P = 0,475$ см; $c_M = 0,71$ Дж/(Г·°С); $\gamma_M = 7,86$ г/см³; $a_M = 0,1$ см²/с; $K_1 = 0,8$; $K_2 = 1$; $d_{\Xi-Д} = 3$ см; $a_{\Xi} = 0,243$ см²/с; $c_{\Xi} = 0,419$ Дж/(Г·°С); $\gamma_{\Xi} = 8,23$ г/см³.

Принималось допущение. Ввиду относительно малого линейного расстояния между соседними рельефами, не превышающего 25 мм, теплоотвод в электроды с температурой их нагрева до $0,125T_{ПЛ}$ происходит по всей площади контакта электрод–деталь, определяемой диаметром контактной поверхности каждого электрода, равным 30 мм.

Таким образом, формула (3.6) с представлением размерностей подставляемых величин приняла вид:

$$K = \left[0,75n \cdot 0,2 \text{ см} \cdot 0,475^2 \text{ см}^2 \cdot 0,71 \frac{\text{Дж}}{\text{Г} \cdot ^\circ\text{С}} \cdot 7,86 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3} \right] /$$

$$/ \left[\left(3n \cdot 0,2 \text{ см} \cdot \sqrt{0,1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \cdot \tau_{CB}} \cdot \left(0,475 \text{ см} + 4 \cdot \sqrt{0,1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \cdot \tau_{CB}} \right) \cdot 0,8 \cdot 0,71 \frac{\text{Дж}}{\text{Г} \cdot ^\circ\text{С}} \cdot 7,86 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3} \right) + \right.$$

$$\left. + \left(0,25 \cdot 1 \cdot 3^2 \text{ см}^2 \cdot \sqrt{0,243 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \cdot \tau_{CB}} \cdot 0,419 \frac{\text{Дж}}{\text{Г} \cdot ^\circ\text{С}} \cdot 8,23 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3} \right) \right].$$

После сокращений и преобразований формула (3.6) приняла вид:

$$K = \frac{Q_{II}}{Q_M + Q_{\Xi}} = \frac{0,1888n}{1,07n\tau_{CB} + \sqrt{\tau_{CB}}(0,4n + 3,82)}. \quad (3.7)$$

Затем было предположено, что процентная доля полезной энергии, расходуемой на нагрев и плавление центрального столбика металла, и энергии тепловых потерь, расходуемой на теплоотвод в электроды и близлежащие слои металла свариваемых деталей, в общем количестве энергии, вводимой в межэлектродную зону, не изменяется при увеличении количества деталей пакета, т. е. значения составляющих энергии должны увеличиваться пропорционально увеличению количества деталей в пакете.

Для проверки данного предположения по формуле (3.6) был рассчитан критерий КТП для двух случаев:

1) КРС обычного соединения, состоящего из двух пластин толщиной 2 + 2 мм из низкоуглеродистой стали по трем круглым рельефам на одной из них (материал электрода – бронза БрБ2);

2) КРС пакетного соединения, состоящего из трех таких же пластин с тремя парами таких же рельефов на наружных из них (материал электрода – бронза БрБ2).

Для расчета по первому случаю по [1] приняли $\tau_{CB} = 0,33$ с.

Для расчета по второму случаю были проведены предварительные эксперименты по сварке рассматриваемых пакетных соединений на мягких и жестких режимах, после чего с учетом рекомендаций из литературы для КРС соединений пластин, состоящих из двух деталей с суммарными схожими толщинами (2 + 2 + 2 мм) [1], для рассматриваемых пакетов приняли $\tau_{CB} = 0,48$ с и $F_{CB} = 5,5$ кН.

В результате расчета значение критерия КТП оказалось равным для обоих случаев КРС: $K = 0,112$.

Таким образом, с подстановкой $K = 0,112$ в формулу (3.7) был выражен параметр τ_{CB} (в секундах) в зависимости от количества свариваемых деталей пакета n (в штуках) в случае КРС трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм из низкоуглеродистой стали по трем парам круглых сферических рельефов одновременно:

$$\tau_{CB} = \frac{\left(\sqrt{a^2 + 6,3} - a\right)}{4}, \quad (3.8)$$

где $a = 0,37 + \frac{3,57}{n}$.

В свою очередь, формула расчета параметра τ_{CB} по критерию КТП для случая КРС пакетных соединений, состоящих из n -пластин, одновременно по трем парам круглых выштампованных рельефов в общем виде имеет вид [144]:



$$\tau_{CB} = ([\sqrt{(3K_1 n \delta d_P c_M \gamma_M \sqrt{a_M} + 0,25 K_2 d_{\text{Э-Д}}^2 c_{\text{Э}} \gamma_{\text{Э}} \sqrt{a_{\text{Э}}})^2 + (36 K_1 n^2 \delta^2 d_P^2 c_M^2 \gamma_M^2 a_M K) - (36 K_1 n^2 \delta^2 d_P^2 c_M^2 \gamma_M^2 a_M K)}])^2 / [2304 K_1^2 n^2 \delta^2 a_M^2 c_M^2 \gamma_M^2]. \quad (3.9)$$

Таким образом, было установлено, что на основе определения значения критерия КТП для различных материалов свариваемых деталей, а также геометрий и количества имеющихся на них рельефов можно вычислить требуемое значение параметра τ_{CB} для КРС пакетов, состоящих из конкретного количества равнотолщинных деталей.

В таблице 3.1 представлены значения параметра τ_{CB} для КРС пакетов, состоящих из 3...10 листов из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм (по трем парам круглых рельефов одновременно).

Таблица 3.1 – Расчетные значения параметра τ_{CB} для КРС пакетных соединений листов из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм каждый (по трем парам круглых рельефов одновременно)

n , шт.	τ_{CB} , с	$Q_{\text{ПОЛ}}$, Дж	$Q_{\text{ПОТ}}$, Дж	$Q_{\text{ЭЭ}}$, Дж	$K = Q_{\text{П}} / (Q_{\text{М}} + Q_{\text{Э}})$
2	0,33	1815	16246	18061	0,112
3	0,48	2722	24380	27102	
4	0,60	3629	32516	36145	
5	0,68	4537	40653	45189	
6	0,74	5444	48790	54234	
7	0,79	6352	56927	63279	
8	0,83	7259	65065	72324	
9	0,86	8166	73203	81369	
10	0,89	9074	81340	90414	

Данные значения необходимо использовать для последующего расчета параметра I_{CB} по УТБ и закону Джоуля-Ленца в каждом конкретном случае [51].

Однако при этом следует экспериментальным путем предварительно определять ориентировочное значение сопротивления межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}}$ в момент выключения сварочного тока для каждого случая сварки пакета, т. к. в литературе по сварке давлением такие рекомендации отсутствуют.

В случае КРС по одному выштампованному рельефу для различной его формы формулы расчета критерия КТП принимают следующий вид:

– для круглого рельефа

$$K = \frac{0,25n\delta d_P^2 c_M \gamma_M}{\left(n\delta\sqrt{a_M\tau_{CB}}\left(d_P + 4\sqrt{a_M\tau_{CB}}\right)K_1 c_M \gamma_M\right) + \left(0,25K_2 d_{\Theta-D}^2 \sqrt{a_{\Theta}\tau_{CB}} c_{\Theta} \gamma_{\Theta}\right)}; \quad (3.10)$$

– для кольцевого рельефа

$$K = \frac{4n\delta c_M \gamma_M \left(D_P^2 - d_P'^2\right)}{n\delta K_1 c_M \gamma_M \left(16D_P \sqrt{a_M\tau_{CB}} + 16a_M \tau_{CB} + d_P'^2\right) + \left(4K_2 d_{\Theta-D}^2 \sqrt{a_{\Theta}\tau_{CB}} c_{\Theta} \gamma_{\Theta}\right)}; \quad (3.11)$$

– для продолговатого четырехугольного рельефа

$$K = \frac{16lbn\delta c_M \gamma_M}{n\delta K_1 c_M \gamma_M \left(\pi l^2 + 16\pi l \sqrt{a_M\tau_{CB}} + 16\pi a_M \tau_{CB} - 4bl\right) + \left(4K_2 d_{\Theta-D}^2 \sqrt{a_{\Theta}\tau_{CB}} c_{\Theta} \gamma_{\Theta}\right)}, \quad (3.12)$$

где D_P – внешний диаметр кольцевого рельефа;
 d_P' – внутренний диаметр кольцевого рельефа;
 b – ширина продолговатого четырехугольного рельефа;
 l – длина продолговатого четырехугольного рельефа.

3.3 Конечно-элементное моделирование этапов кинетики формирования пакетных нахлесточных соединений при КРС

Для процесса КРС по одной паре круглых сферических рельефов пакетного нахлесточного соединения, состоящего из трех пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм из низкоуглеродистой холоднокатаной стали, в программной среде MSC.MARC был произведен пошагово-совмещенный электротермодеформационный расчет. На рисунке 3.9 представлен его алгоритм.

Целью расчета являлось определение основных этапов кинетики формирования рельефных пакетных сварных соединений для возможности последующей разработки энергоэффективных циклограмм процесса КРС с точки зрения соотношения «уровень тока – вводимая энергия» при поэтапном дозированном введении энергии в межэлектродную зону путем задания многоступенчатого импульса сварочного тока.

По алгоритму расчета осуществлялись следующие процедуры:

- 1) устанавливались цели моделирования;
- 2) выбирались исходные данные;



- 3) разрабатывалась модель объекта (при учете основных физических процессов и игнорировании второстепенных малозначимых факторов);
- 4) формировался алгоритм реализации расчета;
- 5) подготавливались и задавались исходные данные;
- 6) проводился вычислительный эксперимент (расчет);
- 7) оценивалась адекватность модели реальному процессу КРС;
- 8) оценивалась точность расчетов.

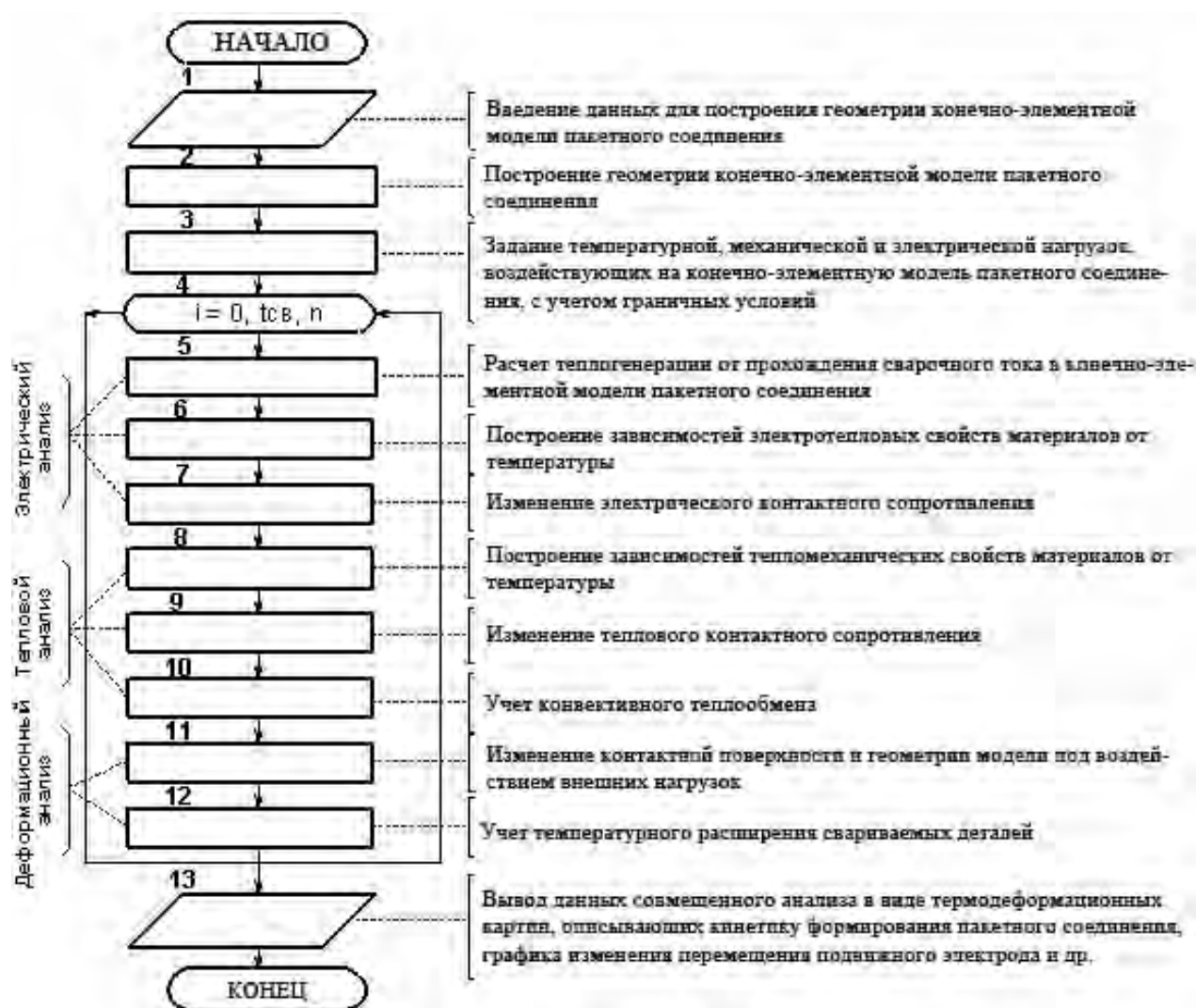


Рисунок 3.9 – Алгоритм электротермодеформационного расчета процесса КРС пакетного соединения пластин

В соответствии с алгоритмом конечно-элементного моделирования, ранее предложенным в [52], предварительно был сформирован командный файл. В дальнейшем автоматический запуск данного файла на ЭВМ обеспечивал весь совмещенный электротермодеформационный расчет процесса КРС, который осуществлялся с учетом геометрических характеристик рельефов, заданных параметров режима сварки и материалов свариваемых деталей (а также электродов) (рисунок 3.10).

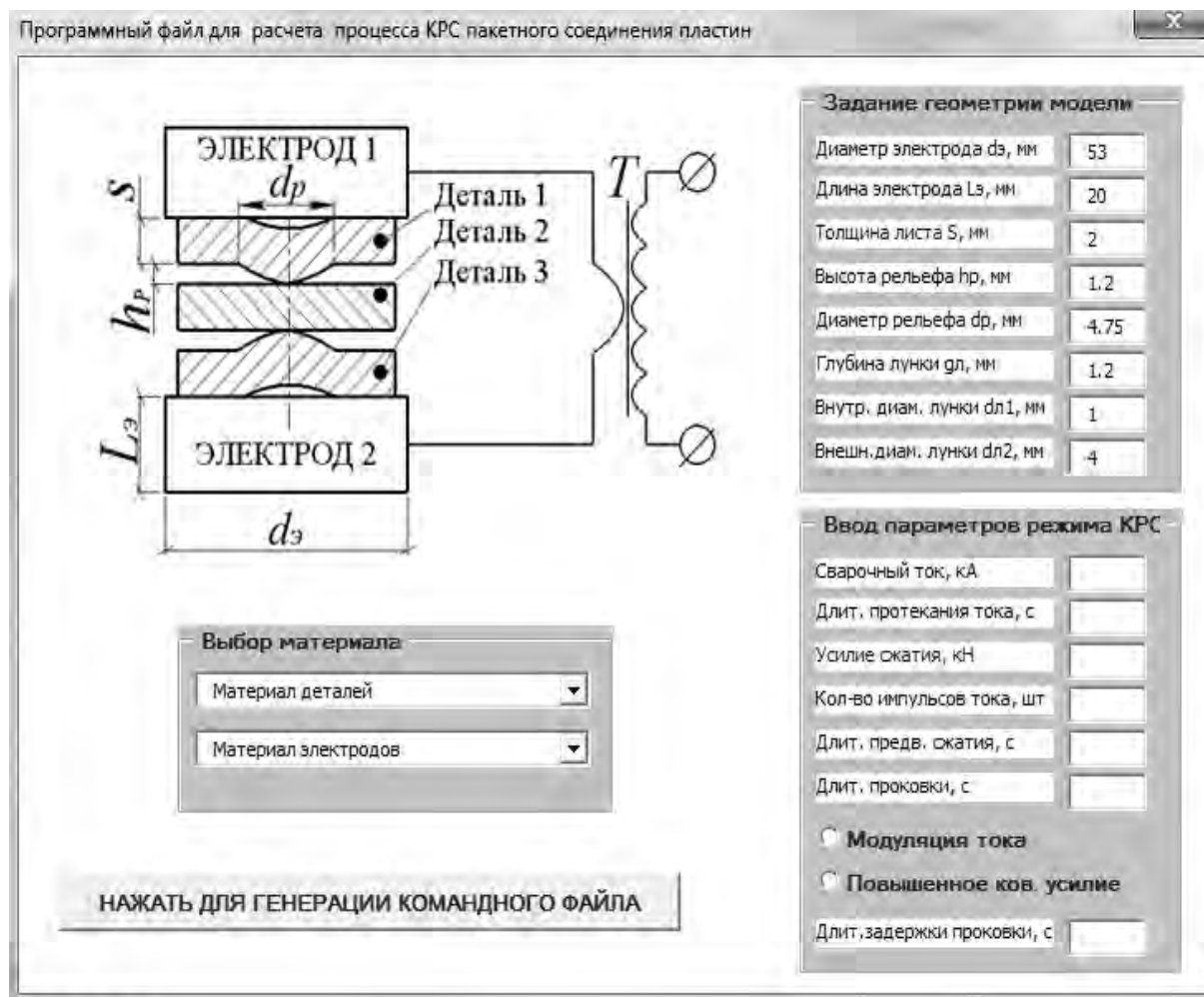


Рисунок 3.10 – Программный файл для запуска расчета процесса КРС

Характеристики материалов свариваемых деталей (низкоуглеродистая сталь) и электродов (бронза БрБ2) выбирались из базы данных среды MSC.MARC, содержащей зависимости электротеплофизических и механических свойств от температуры. Например, на рисунке 3.11 представлена задаваемая в расчете зависимость удельной теплоемкости низкоуглеродистой стали (в джоулях на килограмм-кельвин) от температуры (в кельвинах).

Перечень задаваемых в расчете характеристик (в системе СИ):

- для стали – модуль Юнга, теплопроводность, удельная теплоемкость, удельное электросопротивление, предел текучести, коэффициент температурного расширения, модуль пластического сдвига, коэффициент Пуассона;
- для бронзы – модуль Юнга, теплопроводность, удельная теплоемкость, удельное электросопротивление.

Дополнительно задавались диаграммы упрочнения при пластической деформации (отдельно для стали и бронзы). Применительно к стали был задействован метод кусочного задания для изотропного материала с условием пластичности по Мизесу.

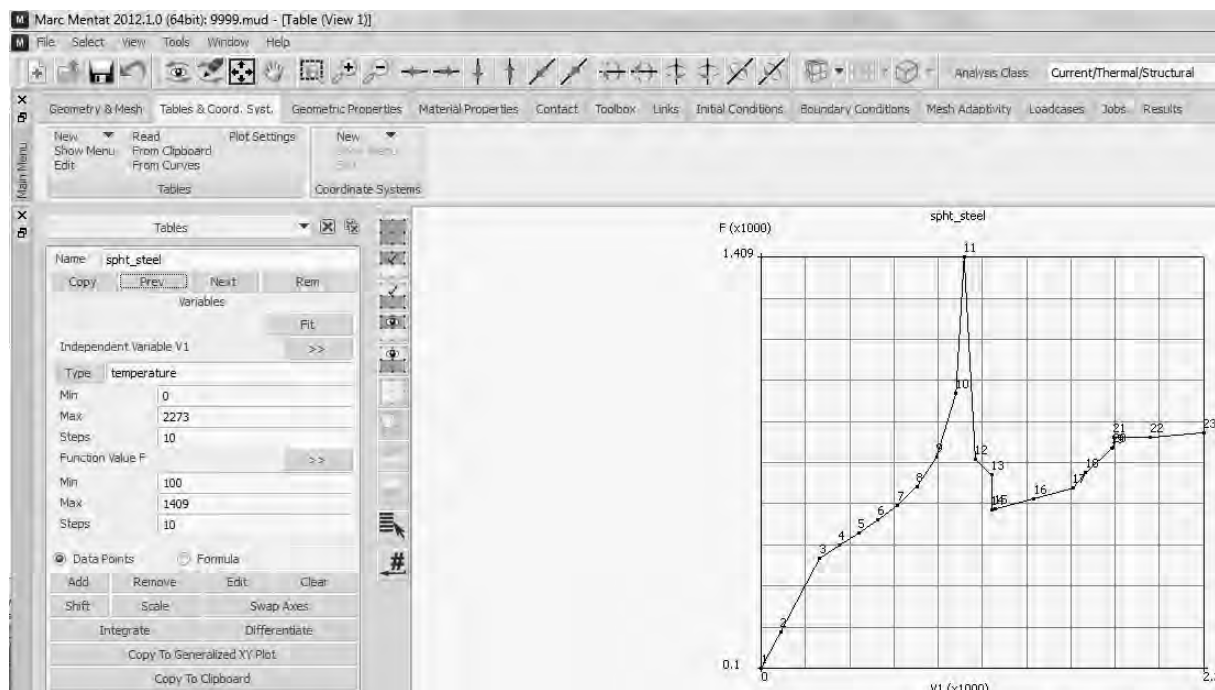


Рисунок 3.11 – Задание зависимости удельной теплоемкости от температуры (для стали)

В расчете учитывалась динамика изменения усилия сжатия электродов в процессе КРС при деформировании рельефа и модуляция импульса сварочного тока, заложенные в программе MCS.MARC через соответствующие размерные коэффициенты.

В разработанной модели алгоритм численной реализации осуществлял три типа расчета:

- 1) электрический (с целью установления зоны протекания сварочного тока);
- 2) тепловой (с целью установления температурных полей при сварке);
- 3) механический (с целью установления характера пластических деформаций металла межэлектродной зоны).

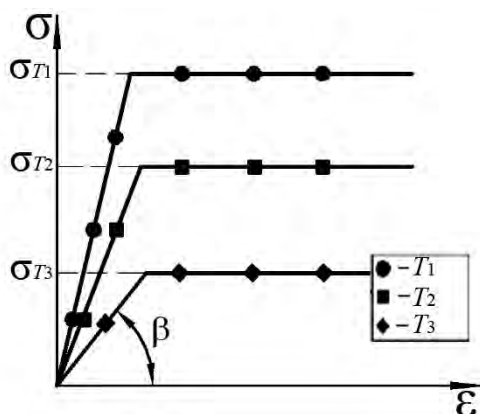
Линии протекания сварочного тока при задании прикладывались к геометрической кривой (как элементу геометрии модели), связанной с числом конечных элементов на данном инкременте расчета.

Таким образом, электрической характеристикой являлась величина сварочного тока, распределенная с заданной плотностью в контактах электрод–деталь и деталь–деталь, а также в металле свариваемых деталей.

Тепловой характеристикой являлась величина энергии, нагревающей металл при прохождении через него импульса сварочного тока (в соответствии с законом Джоуля–Ленца).

В качестве деформационной характеристики принималась диаграмма идеального упругопластического материала, характеризующаяся его пределом текучести σ_T и модулем упругости $E = \text{tg}\beta$. Для низкоуглеродистых сталей

истинная диаграмма имеет площадку текучести, поэтому такое допущение не приводит к погрешностям (рисунок 3.12) [46, 145].



$T_3 > T_2 > T_1$ – температура материала; σ_T – предел текучести материала

Рисунок 3.12 – Диаграмма идеального упругопластического материала

Следует отметить, что при осуществлении переноса расчетных данных из электрического анализа в тепловой были учтены следующие факторы:

- зависимость электротеплофизических свойств материалов деталей и электродов от изменяющейся температуры межэлектродной зоны;
- конвективный теплообмен с окружающей средой;
- водяное охлаждение верхнего и нижнего электродов.

В процессе программных вычислений распределение температуры, формируемое по тепловому анализу для определенного временного интервала, передавалось в последующий деформационный расчет.

Особенности деформационного расчета:

1) по заданному значению параметра F_{CB} с учетом площади контакта подвижного электрода с верхней свариваемой деталью рассчитывалась величина давления, прикладываемого к данному электроду и равномерно распределенного по его поверхности;

2) нижний электрод, к которому предъявлялось требование неподвижности, лишился двух степеней свободы (ограничивался в перемещениях по горизонтали и вертикали);

3) площади контактов электрод–деталь и деталь–деталь в момент предварительного сжатия электродов рассматривались как площади холодных металлических контактов поверхностей; в дальнейшем они изменялись в зависимости от температуры и напряжений, действующих в конкретном элементарном объеме.

Из деформационного расчета в электрический передавались следующие результаты:

– величина деформации геометрии модели под действием F_{CB} и теплового расширения свариваемых деталей;

– геометрия поверхностей контактов деталь–деталь и электрод–деталь после их преобразования (модифицированные поверхности).

Особенности электрического расчета:

1) нулевой электрический потенциал устанавливался на нижнем торце нижнего электрода;

2) плотность тока распределялась по торцу верхнего электрода.

В конечном счете в процессе расчета вышеуказанные действия претерпевали многократное повторение с заданными временными интервалами $\Delta\tau$ до момента завершения цикла КРС. Значение $\Delta\tau$ определялось по зависимости [146]

$$\Delta\tau = \frac{l^2 c \gamma}{4\lambda}, \quad (3.13)$$

где l – минимальный линейный размер стороны конечного элемента модели;

c – удельная теплоемкость материала;

γ – плотность материала;

λ – удельная теплопроводность материала.

Сопротивления контактов деталь–деталь и электрод–деталь, а также межконтактных сред вычислялись по следующим зависимостям [52, 147]:

$$R_K = \frac{1}{2,12 \overline{\lambda}_M \left(\frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}} \cdot 10^{-4}; \quad (3.14)$$

$$R_{CP} = \frac{(h_{CP1} + h_{CP2})(1 - m)}{\lambda_{ВОЗД}}, \quad (3.15)$$

где $\overline{\lambda}_M$ – приведенная теплопроводность материалов поверхностей;

$\overline{E}$ – приведенный модуль Юнга материалов поверхностей;

p – давление, прикладываемое к поверхностям;

B_n – коэффициент геометрии поверхностей;

h_{CP1}, h_{CP2} – средние высоты выступов микронеровностей поверхностей;

m – коэффициент заполнения профиля микронеровностей поверхностей;

$\lambda_{ВОЗД}$ – коэффициент теплопроводности воздуха как межконтактной среды.



Тепловая и электрическая проводимости контактов вычислялись следующим образом:

$$\sigma_C^{ТЕПЛ} = \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{CP}}; \quad (3.16)$$

$$\sigma_C^{ЭЛ} = \frac{I}{2\sqrt{L(T_{\max}^2 - T_{ТЕКУЩ}^2)}\pi r_{П.К.}^2}, \quad (3.17)$$

где I – ток в контакте;

L – коэффициент закона Видемана-Франца-Лоренца;

$T_{\max}$ – максимальная температура поверхности контакта;

$T_{ТЕКУЩ}$ – текущая температура поверхности контакта;

$r_{П.К.}$ – радиус поверхности контакта.

В расчетах принималась следующая максимальная температура:

1) $T_{\max} = 1773$ К для контакта деталь–деталь (соответствует температуре солидуса стали);

2) $T_{\max} = 773$ К для контакта электрод–деталь (соответствует температуре эвтектоида для сплава железа и бронзы).

В итоге конечно-элементная модель процесса получения пакетных нахлесточных рельефных соединений в общем виде представляла собой систему нелинейных уравнений, по сути описывающих процесс выделения в межэлектродной зоне энергии при протекании импульса тока I_{CB} и напряженно-деформированное состояние металла межэлектродной зоны при действии усилия сжатия электродов F_{CB} .

При этом данные зависимости в процессе расчета дополнялись начальными и граничными условиями, а также специальными уравнениями для учета зависимостей свойств металла от роста температуры (линейных и нелинейных).

Для цилиндрической системы координат $(r; \theta; z)$ при условии независимости распределения электрических и температурных полей от угловой координаты θ применяемые в расчетах стационарное и нестационарное уравнения электро- и теплопроводности соответственно имели следующий вид:

$$\sigma_E \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\sigma_E}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \sigma_E \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (3.18)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = c_M \gamma_M \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (3.19)$$



где φ – функция электрического потенциала от текущей координаты;
 T – функция температуры от текущей координаты;
 σ_E – удельная электропроводность материала детали пакета;
 λ – удельная теплопроводность материала детали пакета;
 c_M – удельная теплоемкость материала детали пакета;
 γ – плотность материала детали пакета;
 τ – длительность процесса сварки;
 Q – энергия, выделяемая в единицу времени в конкретном элементарном объеме.

Для деформационного расчета с учетом введенных тензоров напряжений и деформаций (рисунок 3.13) использовались следующие уравнения равновесия и совместности деформаций:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{rz}}{\partial r \partial z}; \\ \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} + \frac{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)}{r} = 0. \end{cases} \quad (3.20)$$

При этом для расчета упругой составляющей полной деформации и изотермического деформирования металла использовался закон Гука, а для неадиабатического – уравнение теории течения с условием текучести по Мизесу без упрочнения

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2} = \sigma_T, \quad (3.21)$$

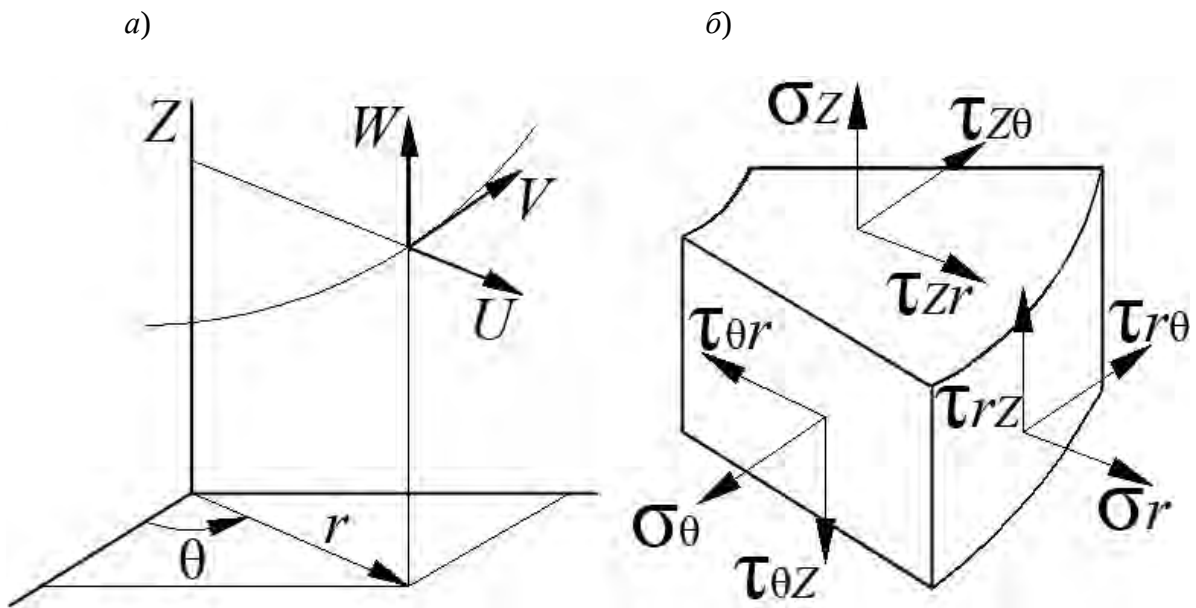
где σ_i – обобщенное напряжение, характеризующее работу и мощность пластической деформации;

σ_T – предел текучести материала свариваемой детали пакета.

На рисунке 3.14 показано разбиение на конечные элементы осесимметричной модели верхний электрод – детали – нижний электрод для рассматриваемого пакетного соединения. Начальное количество конечных элементов составляло 1148, узлов элементов – 710, кривых – 28.

Моделируемый объект обладал геометрической осью симметрии, поэтому при расчетах предполагалось, что начальные и граничные условия также симметричны по отношению к оси электродов. Таким образом, расчет осуществлялся в осесимметричной постановке с использованием системы координат (r, θ, z) .





a – составляющие вектора перемещений; *b* – составляющие тензора напряжений

Рисунок 3.13 – Обозначения составляющих тензоров напряжений и деформаций

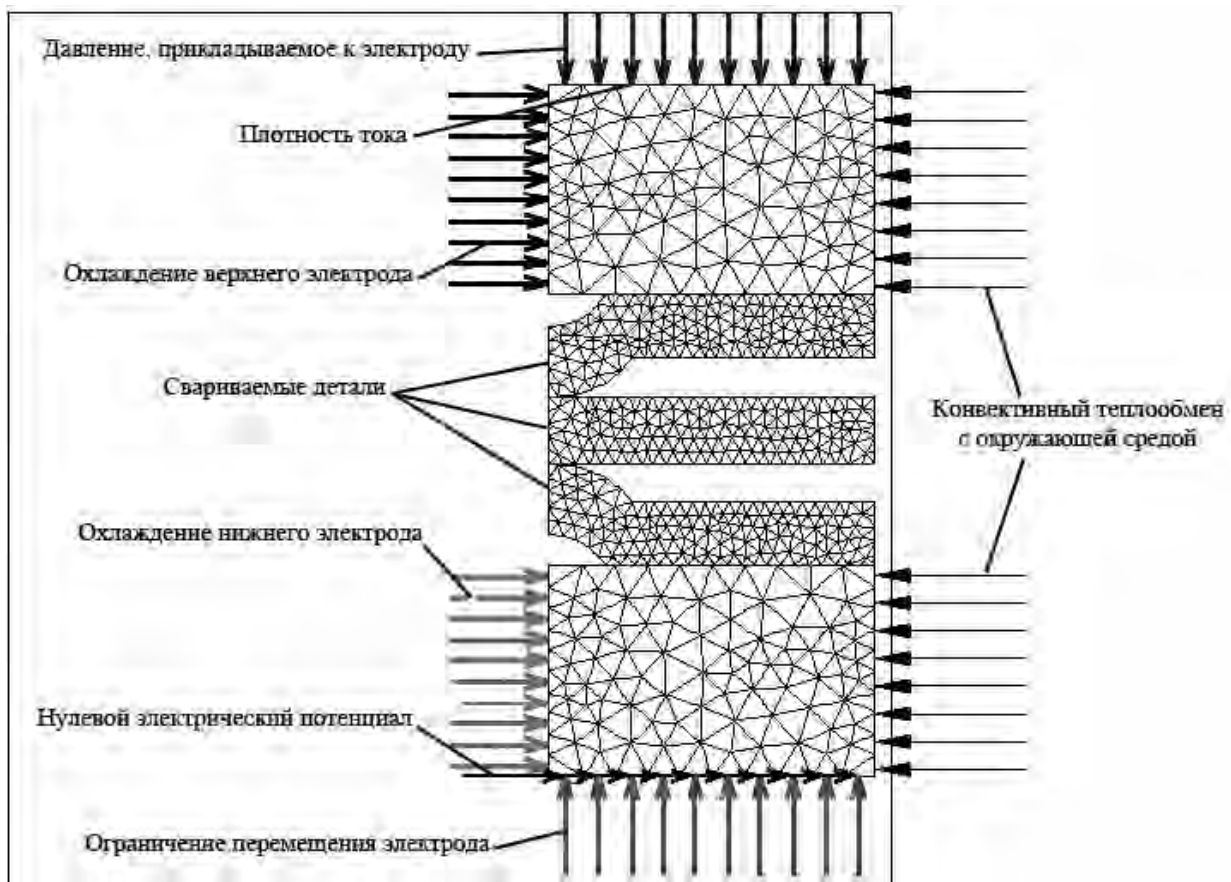


Рисунок 3.14 – Геометрия модели с граничными условиями

В расчетах применялся трехузловой изопараметрический конечный элемент (рисунок 3.15).

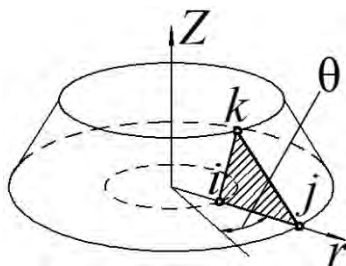


Рисунок 3.15 – Трехузловой изопараметрический конечный элемент

Учет фазовых переходов осуществлялся при помощи опции «LATENT HEAT» заданием величины скрытой теплоты, температуры ликвидуса и температуры солидуса.

При конечно-элементном моделировании процесса КРС использовалась методика расчета, подробно изложенная в [52, 73, 148–151], а затем адаптированная к пакетным соединениям.

Последовательность пошагово-совмещенного расчета следующая:

1) определялись начальные и граничные условия (см. рисунок 3.14):

а) распределение электрического потенциала в начальный момент времени $\varphi(\tau_0) = 0$;

б) граничное условие I рода: задавалась функция распределения потенциала на граничной поверхности объекта. Граница с постоянным потенциалом, равным нулю, задавалась на торце нижнего электрода;

в) граничное условие II рода: задавалась постоянная плотность электрического тока на границе верхнего электрода исходя из установленного значения I_{CB} и площади электрода;

г) задавалось отсутствие изменения разности потенциалов на границе области решения и оси симметрии модели;

д) электрическая проводимость контакта зависела от радиуса контактной поверхности, полученного на предыдущем шаге механического и термического расчетов;

2) для решения нестационарного уравнения теплопроводности, описывающего температурные поля, осуществлялись следующие действия (см. рисунок 3.14):

а) задавалось распределение температуры в начальный момент времени по всем элементам модели ($T(r, z, \tau_0) = 293 \text{ K}$ – температура окружающей среды);

б) задавалась функция распределения температур на граничных поверхностях деталей и электродов (как граничное условие I рода):

– по краю листовой детали (изотермическая граница с $T = 293 \text{ K}$);

– на электродах вдоль оси симметрии (с $T = 281$ К для учёта их водяного охлаждения);

в) задавалось отсутствие теплового потока на оси симметрии модели (как граничное условие II рода);

г) задавался конвективный теплообмен между свободными поверхностями деталей, электродов и окружающей средой через коэффициенты теплоотдачи плоских поверхностей в условиях естественной конвекции в неограниченном пространстве (граничное условие III рода);

д) задавался тепловой поток, проходящий через поверхности контактов деталь–деталь и электрод–деталь;

е) задавалось термическое сопротивление межконтактной среды;

3) для расчета напряженно-деформированного состояния осуществлялись следующие действия (см. рисунок 3.14):

а) задавалось отсутствие напряжений в исследуемой среде в начальный момент времени;

б) задавалась внешняя механическая нагрузка, равномерно распределенная по поверхности верхнего электрода;

в) нижний электрод лишался степени свободы при перемещении вдоль оси OZ;

г) внешние нагрузки и граничные условия принимались инвариантными (независимыми) по отношению к координате θ (см. рисунок 3.15);

д) на каждом последующем шаге механического расчета происходил учет начальных деформаций элементов модели (от теплового и механического воздействия на предыдущих шагах).

При моделировании процесса КРС пакетных соединений на ЭВМ имели место значительные пластические деформации конечных элементов, составляющих рельефы. Это приводило к искажению элементной сетки и не позволяло расчету завершиться. По этой причине в процессе расчета производилась модификация элементной сетки с учетом пошагового обновления граничных условий. Если при деформации угол между гранями конечного элемента изменялся на величину $\Delta \geq 40^\circ$ (рисунок 3.16), то элементная сетка автоматически переразбивалась.

В итоге в программной среде MSC.MARC для конечно-элементного расчета процесса КРС рассматриваемых пакетных соединений пластин из низкоуглеродистой стали толщиной $2 + 2 + 2$ мм при сварке по одной паре круглых выштампованных рельефов габаритами $4,75 \times 1,2$ мм задавались следующие основные параметры режима: $\tau_{CB} = 0,48$ с; $I_{CB} = 12,8$ кА; $F_{CB} = 5,5$ кН; материал электродов – бронза БрБ2. Теплоотвод в электроды задавался по кольцевой площади контакта электрод–деталь с параметром $\Delta = 6$ мм (см. формулу (1.9)), а параметр $Q_{ЭЭ}$ составил 6326 Дж (по УТБ) при фактическом $R_{ЭЭ} = 80$ мкОм.



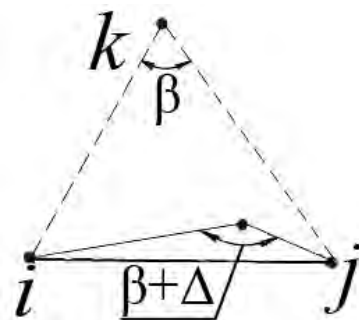
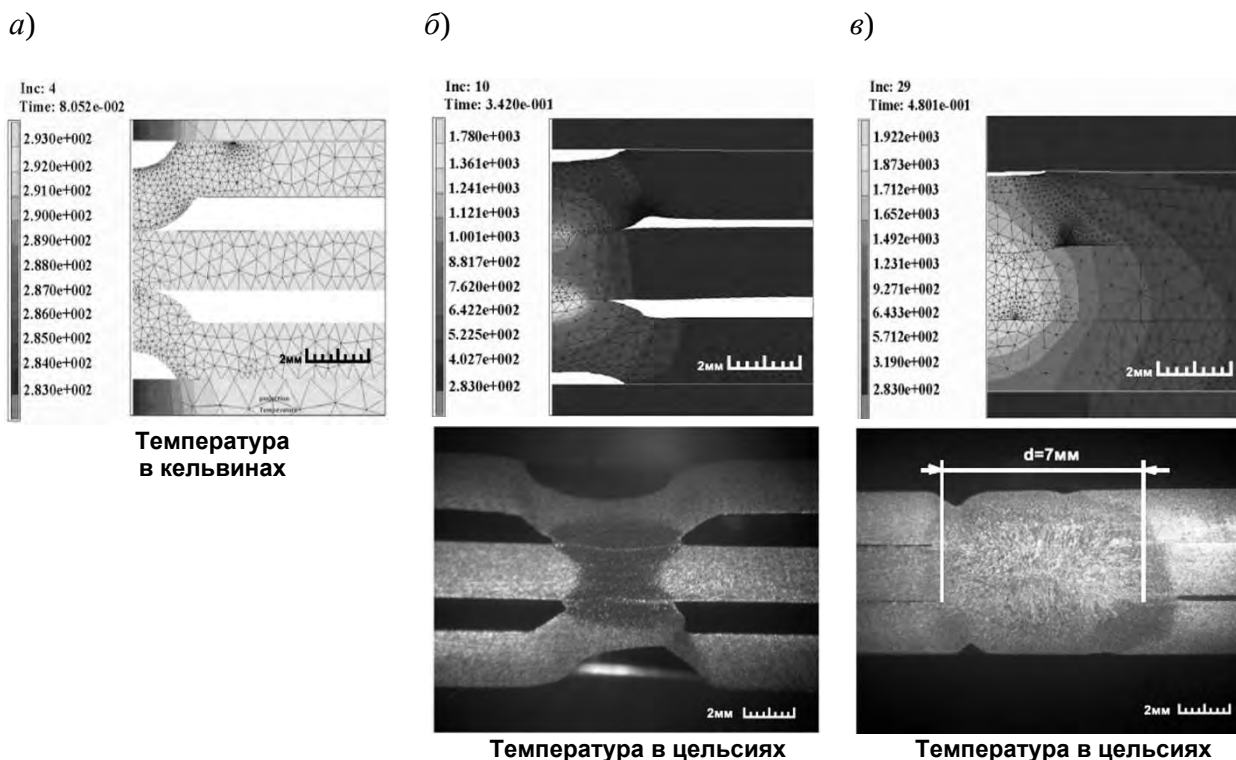


Рисунок 3.16 – Форма конечного элемента при расчетах (пунктиром – на предыдущем инкременте; сплошной линией – на последующем)

В результате проведенных расчетов были получены совмещенные термодетформационные картины (рисунок 3.17), а также кривые перемещения и скорости перемещения подвижного электрода (рисунок 3.18).



а – на этапе предварительного сжатия деталей в холодном состоянии; б – после включения сварочного тока ($\tau_{CB} = 0,34$ с); в – после выключения сварочного тока ($\tau_{CB} = 0,48$ с)

Рисунок 3.17 – Расчетные электротермодетформационные картины

На основании анализа полученных данных для случая КРС пакетных соединений по циклограмме с заданием крутонарастающего смодулированного импульса тока (на обычном регуляторе) были определены пять этапов кинетики их формирования.

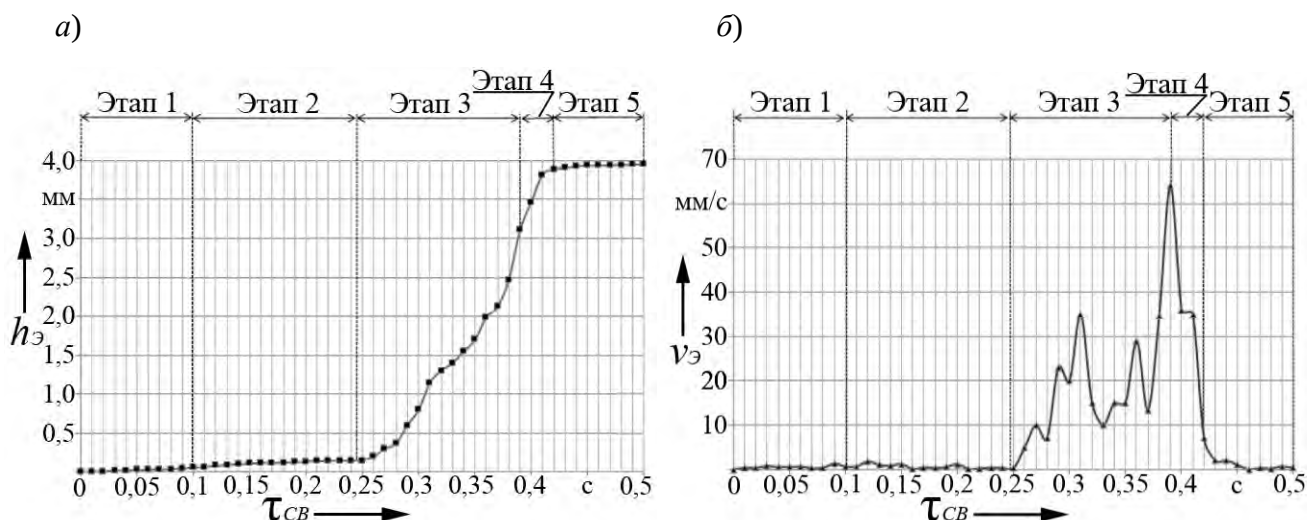


Рисунок 3.18 – Кривые перемещения (а) и скорости перемещения (б) подвижного электрода

На этапе 1 (перед пропуском тока через межэлектродную зону) осевая деформация рельефов в момент сжатия свариваемых деталей в холодном состоянии составляет 0,05...0,1 мм. Эту деформацию определяет перемещение верхнего (подвижного) электрода до образования контакта верхний электрод – верхняя деталь, через который усилие сжатия далее передается металлу свариваемых деталей. До момента включения тока такая деформация рельефов является своеобразным условием получения качественного сварного соединения при КРС, т. к. это стабилизирует начальную площадь контактов деталь–деталь и холодное электрическое сопротивление межэлектродной зоны в целом (см. рисунок 3.18, а).

При этом на данном этапе энергия в межэлектродную зону не вводится, а его длительность задается регулятором цикла сварки при первоначальной настройке. Интервала времени продолжительностью 0,06...0,1 с при КРС вполне достаточно для предварительного сжатия свариваемых деталей в холодном состоянии перед пропуском тока.

На этапе 2 (с момента пропускания тока через межэлектродную зону) осевая деформация рельефов не должна превышать 0,15...0,2 мм. На данном этапе в результате достижения температуры разупрочнения металла свариваемых деталей наблюдается рост площадей контактов деталь–деталь с одновременным удалением из них оксидных пленок. Благодаря этому происходит ускорение активации контактных поверхностей, что особенно важно для обеспечения возможности формирования соединения без расплавления (в твердой фазе) (см. рисунок 3.17, б). Этот процесс уравнивается тепловым расширением металла свариваемых деталей. С целью недопущения чрезмерной деформации рельефов до достижения металлом свариваемых деталей температуры, близкой

к температуре плавления, продолжительность данного этапа необходимо в случае КРС на обычном регуляторе ограничивать временным интервалом, равным 0,14...0,16 с (около 30 % от заданной величины параметра τ_{CB}) (см. рисунок 3.18, б), в случае КРС с внешним воздействием на регулятор определять автоматически по величине энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону.

Так как при КРС относительно малая площадь контактов деталь–деталь обеспечивает высокую плотность тока и ускоренный нагрев в них, на рассматриваемом этапе применение тока подогрева, существенно меньшего в сравнении с расчетным (по УТБ), весьма целесообразно. В свою очередь, это позволит не только достичь вышеуказанных целей, но и уменьшить величину энергии, вводимой в межэлектродную зону на данном этапе.

На этапе 3 происходит интенсивная пластическая деформация металла свариваемых деталей в осевом и радиальном направлениях в результате появления и роста зон его расплавления. Этот процесс должен сопровождаться увеличением скорости перемещения подвижного электрода с 1...2 до 35...65 мм/с, приводящим к интенсивному росту контактных площадок (см. рисунок 3.18, б). Этого можно добиться только в результате нагрева межэлектродной зоны максимально допустимым (расчетным) током, рассчитанным по УТБ. Это позволит обеспечить осевую деформацию рельефов, достаточную для эффективного объемного взаимодействия металла свариваемых деталей. Оптимизация величины энергии, вводимой в межэлектродную зону на данном этапе, крайне важна, т. к. именно это значение в основном определяет общие энергозатраты на процесс КРС. Продолжительность этапа может составлять в случае КРС на обычном регуляторе 0,14...0,16 с (около 30 % от заданной величины параметра τ_{CB}) (см. рисунок 3.18, б), в случае КРС с внешним воздействием на регулятор фактически определяться системой управления по величине энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону (по аналогии с этапом 2).

На этапе 4 при приближении величины междетального зазора к нулю должен наступать момент выключения тока. Необходимо ограничивать продолжительность данного этапа, резко снижая скорость перемещения подвижного электрода до нуля, чтобы не допустить преждевременного касания поверхностей свариваемых деталей до момента образования зоны взаимного расплавления требуемых размеров. При КРС обычным (крутонарастающим) импульсом тока вероятность такого касания довольно высока, т. к. ток относительно большой величины при выключении не успевает за 0,02...0,03 с снизиться до нуля (инерционность выключения тока). Поэтому весьма целесообразно использовать для этих целей ток, существенно меньший в сравнении с максимальным (расчетным по УТБ) и следующий за ним (после этапа 3). В конечном счете на этапе 4 должна происходить полная осадка рельефов по всей их высоте, а также касание поверхностей свариваемых деталей.



На этапе 5 (после выключения тока) происходит проковка соединения, сопровождающаяся протеканием релаксационных процессов, уменьшающих остаточные напряжения в зоне полученного соединения. На данном этапе энергия в межэлектродную зону уже не вводится, а его длительность задается регулятором цикла сварки при первоначальной настройке (по аналогии с этапом 1). Интервала времени продолжительностью 0,06...0,08 с при КРС вполне достаточно для выдержки свариваемых деталей в сжатом состоянии после выключения тока.

Таким образом, было установлено, что на трех из пяти основных этапов кинетики формирования рельефных сварных соединений необходимо осуществлять контролируемый ввод параметра Q_{Σ} (этапы 2–4). При этом на этапе 2 интервал уменьшения R_{Σ} до стабилизированного, относительно постоянного значения должен составлять 0,06...0,08 с после включения тока для перемещения подвижного электрода до 0,15...0,2 мм, что позволит избежать выплеска расплавленного металла и порообразования; на этапе 3 скорость перемещения подвижного электрода должна составлять 35...65 мм/с при интенсивном росте зон взаимного расплавления металла деталей; на этапе 4 скорость перемещения подвижного электрода должна постепенно снижаться до нуля вплоть до момента полной деформации рельефов и выключения тока во избежание его шунтирования по резко возрастающей площади контакта деталей [51, 139, 152].

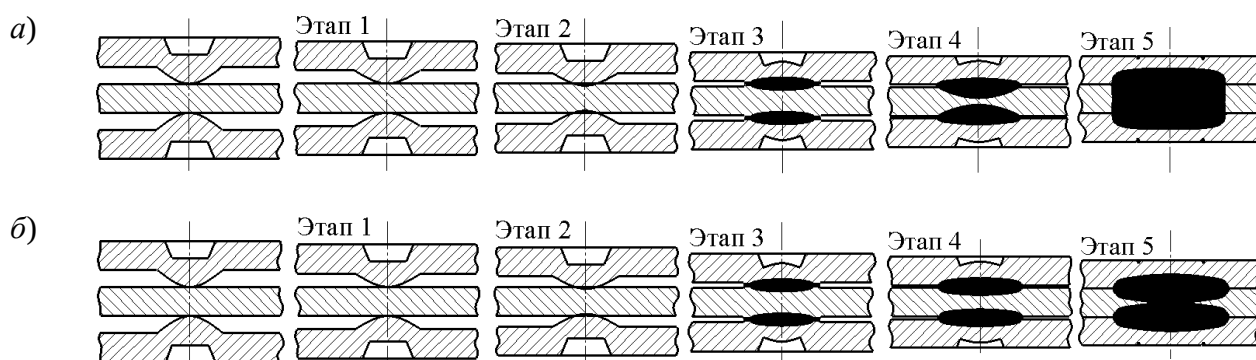
Проведенное конечно-элементное моделирование подтвердило, что процесс формирования рельефных пакетных соединений трех деталей с последовательным протеканием тока через них может иметь две схемы развития.

1 После возникновения и роста отдельных зон взаимного расплавления металла деталей начинается их взаимодействие между собой, т. е. у трех свариваемых деталей формируется одно общее ядро. Это характерно для сварки на жестких режимах по обычной циклограмме нагрева, согласно которой величина сварочного тока нарастает до максимального значения при постоянном усилии сжатия электродов. При этом в межэлектродную зону на этапах 2–4 должно контролироваться вводиться такое количество энергии, которого достаточно для обеспечения проплавления металла деталей пакета на 50...100 % по толщине. Потребление электроэнергии для сварочной машины в таком случае может завышаться, особенно при преждевременной деформации недостаточно жестких рельефов (рисунок 3.19, а).

2 Общая зона взаимного расплавления металла деталей отсутствует. Для каждой пары контактирующих деталей пакета образуются или отдельные зоны взаимного расплавления, не взаимодействующие между собой вплоть до момента выключения тока, или общие неразъемные объемы металла без расплавления (в твердой фазе). Добиться этого можно либо использованием в циклограмме процесса КРС дополнительного (повышенного ковочного) усилия



после преждевременного выключения тока, либо изменением характера введения энергии в межэлектродную зону, определяемой особой формой импульса тока (отличающейся от стандартной крутонарастающей). Проплавление деталей при этом может отсутствовать при одновременном обеспечении прочности сварного соединения в пределах 80...90 % от требуемой (рисунок 3.19, б). Мягкие режимы КРС для таких целей не подходят, т. к. в этих случаях деформация рельефа происходит с увеличением площади теплоотвода из межэлектродной зоны на начальном этапе процесса сварки и величины полезной энергии становится недостаточно для взаимного проплавления металла деталей пакета и получения соединения с прочностью, близкой к требуемой.



а – с образованием общей зоны взаимного расплавления металла деталей;
б – с образованием отдельных зон взаимного расплавления металла деталей либо зон твердой фазы

Рисунок 3.19 – Схемы формирования прочных пакетных соединений

3.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС

После конечно-элементного моделирования процесса КРС и установления основных этапов кинетики формирования пакетных нахлесточных соединений пластин на экспериментальной установке (см. рисунок 2.39) была осуществлена сварка пакетов, состоящих из трех, четырех и пяти деталей, толщина каждой из которых составляла 2 мм. Сварка производилась по трем парам круглых выштампованных рельефов габаритами $4,75 \times 1,2$ мм одновременно.

Параметр τ_{CB} для каждого случая задавался на регуляторе РКС-801 по таблице 3.1 в соответствии с разработанной методикой его расчета по критерию КТП на основе УТБ (см. подразд. 3.2).

Параметр I_{CB} предварительно рассчитывался по УТБ в соответствии с заданными значениями параметра τ_{CB} и ориентировочными значениями параметра $R_{ЭЭ}$ в момент выключения тока, предварительно установленными при

пробных сварках пакетов. Задавался параметр I_{CB} с помощью системы САУ КРС «Энергия» (см. таблицу 2.1).

В процессе КРС варьировался только параметр F_{CB} на манометре машины МТ-3201 путем регулировки редуктора в соответствии с переводной таблицей из техпаспорта (таблица перевода атмосфер в килоньютоны).

На основании требуемых значений параметра $Q_{ЭЭ}$, вводимых в программный код среды LVW 2010 из таблицы 3.1, а также заданных значений параметра τ_{CB} экспериментально были определены установившиеся значения параметра $R_{ЭЭ}$ в момент выключения тока и оптимальные значения параметра F_{CB} (таблица 3.2) [51].

Таблица 3.2 – Установленные значения параметров I_{CB} , $R_{ЭЭ}$ и F_{CB} для КРС пакетов, состоящих из 3, 4 и 5 листов из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм каждый (по трем парам круглых рельефов одновременно)

n , шт.	τ_{CB} , с	I_{CB} , кА	$Q_{ЭЭ}$, Дж	F_{CB} , кН	$R_{ЭЭ}$, мкОм
2	0,33	27	18061	4,5	75
3	0,48	26,5	27102	5,5	80
4	0,6	25,3	36145	6,1	94
5	0,68	24,7	45189	6,6	109

В результате экспериментов было установлено, что при увеличении количества деталей пакета на одну параметр F_{CB} необходимо увеличивать не менее чем на 0,5 кН для обеспечения отсутствия выплесков, непроваров и дефектов литой зоны.

Эксперименты подтвердили адекватность разработанной методики по определению значений таких основных параметров режима, как τ_{CB} , I_{CB} и F_{CB} , для КРС пакетов, состоящих из различного количества односторонних деталей. Расхождение значений расчетной энергии и энергии, фактически вводимой в межэлектродную зону и регистрируемой системой САУ КРС «Энергия», составило 1...3 % (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Сравнение результатов расчета и эксперимента

n , шт.	$Q_{ЭЭ}$, Дж (расчетное значение по критерию КТП и УТБ, задаваемое в системе САУ КРС «Энергия»)	$Q_{ЭЭ}$, Дж (значение, фактически регистрируемое системой САУ КРС «Энергия» при эксперименте)
2	18061	18010
3	27102	26979
4	36145	36035
5	45189	45110

Далее на примере КРС пакетов, состоящих из трех деталей, было проанализировано влияние параметра F_{CB} на скорость нарастания действующего значения I_{CB} , параметр $R_{ЭЭ}$, мощность межэлектродной зоны $P_{ЭЭ}$ (далее – параметр $P_{ЭЭ}$), параметр $Q_{ЭЭ}$ (рисунок 3.20) [51].

Было установлено, что повышение параметра F_{CB} увеличивает крутизну нарастания импульса тока, начиная с первых 3...4 периодов сварки. При оптимальном $F_{CB} = 5,5$ кН величина установившегося значения параметра I_{CB} в момент выключения тока составляет 26,5 кА. Снижение F_{CB} до 4,9 кН приводит к уменьшению I_{CB} на 3...4 %, а повышение F_{CB} до 6,1 кН – к увеличению тока на 2...4 % (см. рисунок 3.20, а). Это объясняется тем, что при увеличении F_{CB} (при постоянстве остальных параметров) происходит более интенсивное смятие и плавление микронеровностей на поверхностях деталей, приводящее к увеличению площадей контактов деталь–деталь и соответствующему уменьшению параметра $R_{ЭЭ}$ (см. рисунок 3.20, б). Причем наибольшее влияние изменение F_{CB} оказывает на начальное холодное сопротивление межэлектродной зоны, разброс значений которого при $\tau_{CB} = 0$ составляет около 50 мкОм.

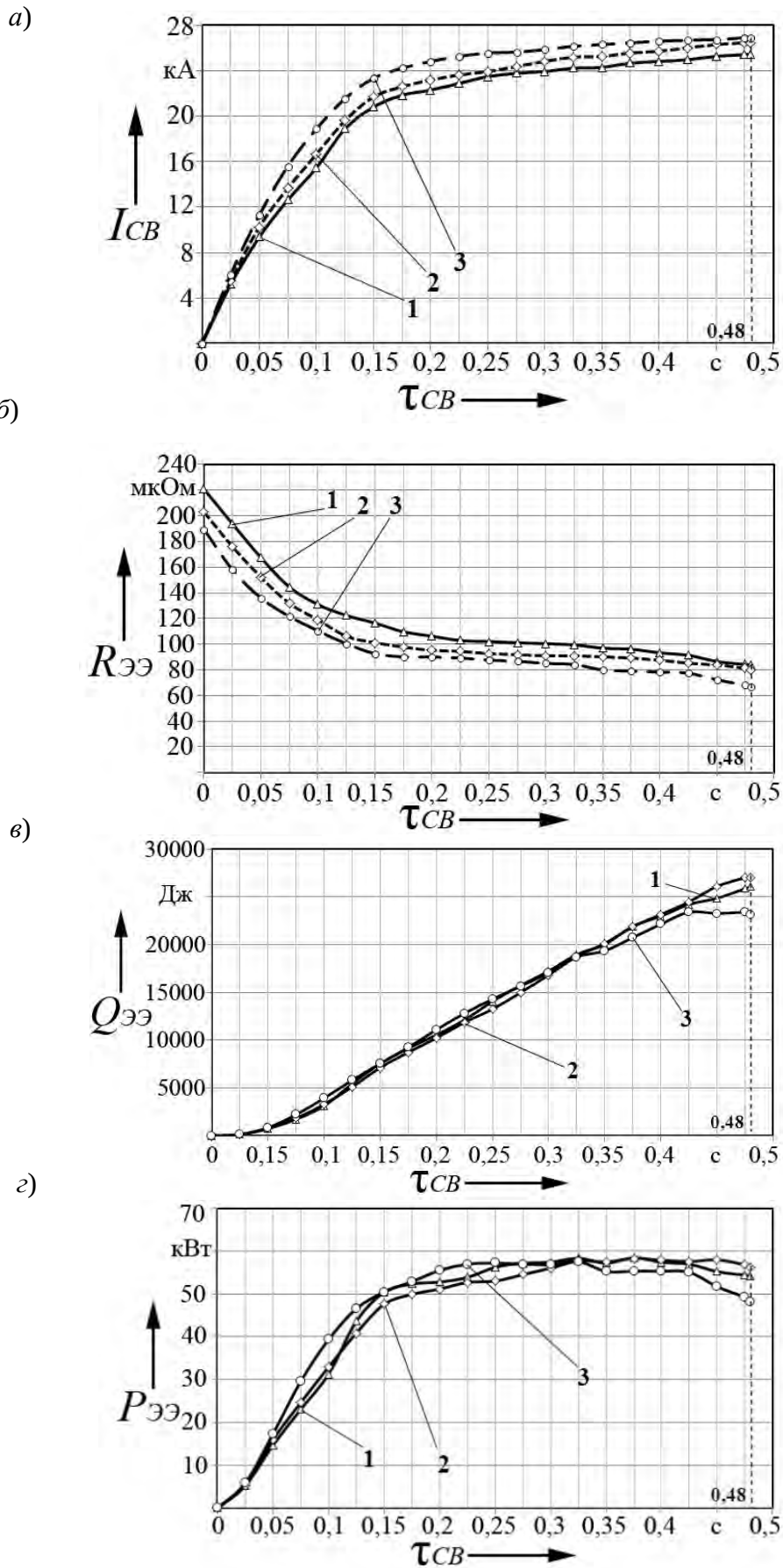
В конце процесса сварки $R_{ЭЭ}$ стабилизируется и при $\tau_{CB} = 0,48$ с разброс его значений сокращается до 20 мкОм. В свою очередь, при увеличении F_{CB} от оптимальных 5,5 кН ($R_{ЭЭ} = 203$ мкОм) до 6,1 кН происходит падение начального значения $R_{ЭЭ}$ примерно на 6...7 %, а при уменьшении F_{CB} до 4,9 кН это значение увеличивается на 8...9 %.

Увеличение F_{CB} выше оптимальных 5,5 кН с одновременным увеличением площадей контактов деталь–деталь приводит к падению $R_{ЭЭ}$ в момент выключения тока примерно на 20...25 %, в результате чего ток вырастает на 1...3 %, а количество энергии, вводимой в межэлектродную зону, уменьшается примерно на 18...20 % (см. рисунок 3.20, в). Из рисунка 3.20, г видно, что при этом в первые 6...7 периодов сварки происходит рост параметра $P_{ЭЭ}$ на 12...14 %, что объясняется изменением крутизны нарастания импульса тока в эти же периоды при некотором уменьшении $R_{ЭЭ}$ в связи с максимальными площадями контактов деталь–деталь, т. к. происходит полная осадка рельефов и дополнительное шунтирование сварочного тока по их периметрам.

Последующая КРС образцов пакетных соединений с вариацией параметра F_{CB} относительно оптимальных значений позволила подтвердить установленные закономерности влияния режимов на параметры процесса и оценить возможность образования дефектов:

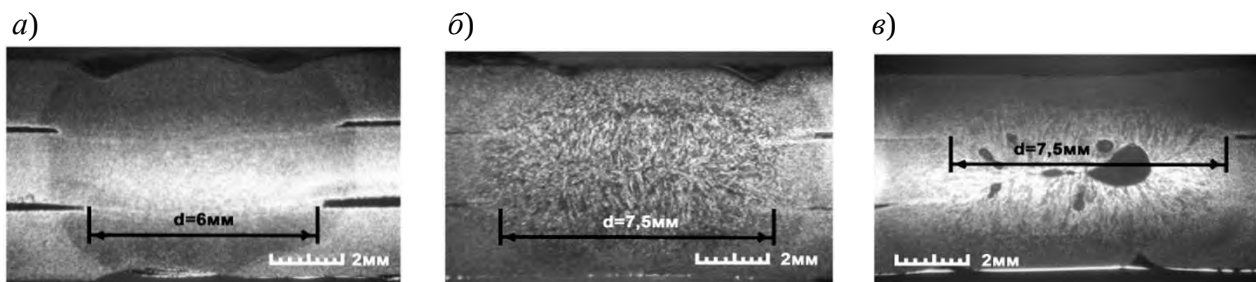
- на производстве положительные перепады сетевого давления и инерционность привода контактной машины, вызывающие превышение параметра F_{CB} на 10 % и уменьшение вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 18...20 % относительно оптимального значения (на рисунке 3.21, б изображено бездефектное соединение), приводят к появлению дефектов типа «пора» (рисунок 3.21, в);
- отрицательные перепады сетевого давления, вызывающие уменьшение F_{CB} на 10 % и уменьшение вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 4...5 %, приводят к появлению дефектов типа «непровар» (рисунок 3.21, а) [153].





1 – $F_{CB} = 4,9$ кН; 2 – $F_{CB} = 5,5$ кН; 3 – $F_{CB} = 6,1$ кН (позиция «2» регулятора по току)

Рисунок 3.20 – Влияние параметра F_{CB} на параметры I_{CB} (а), $R_{ЭЭ}$ (б), $Q_{ЭЭ}$ (в) и $P_{ЭЭ}$ (г)



a – $F_{CB} = 4,1$ кН; *б* – $F_{CB} = 5,5$ кН (оптимально); *в* – $F_{CB} = 6,1$ кН

Рисунок 3.21 – Влияние параметра F_{CB} на дефектность соединений (пакет из трех деталей)

Далее на примере КРС пакетов, состоящих из четырех деталей, было проанализировано влияние параметра I_{CB} на параметры $R_{\Sigma\Sigma}$, $P_{\Sigma\Sigma}$, $Q_{\Sigma\Sigma}$, а также на форму импульса тока (рисунок 3.22).

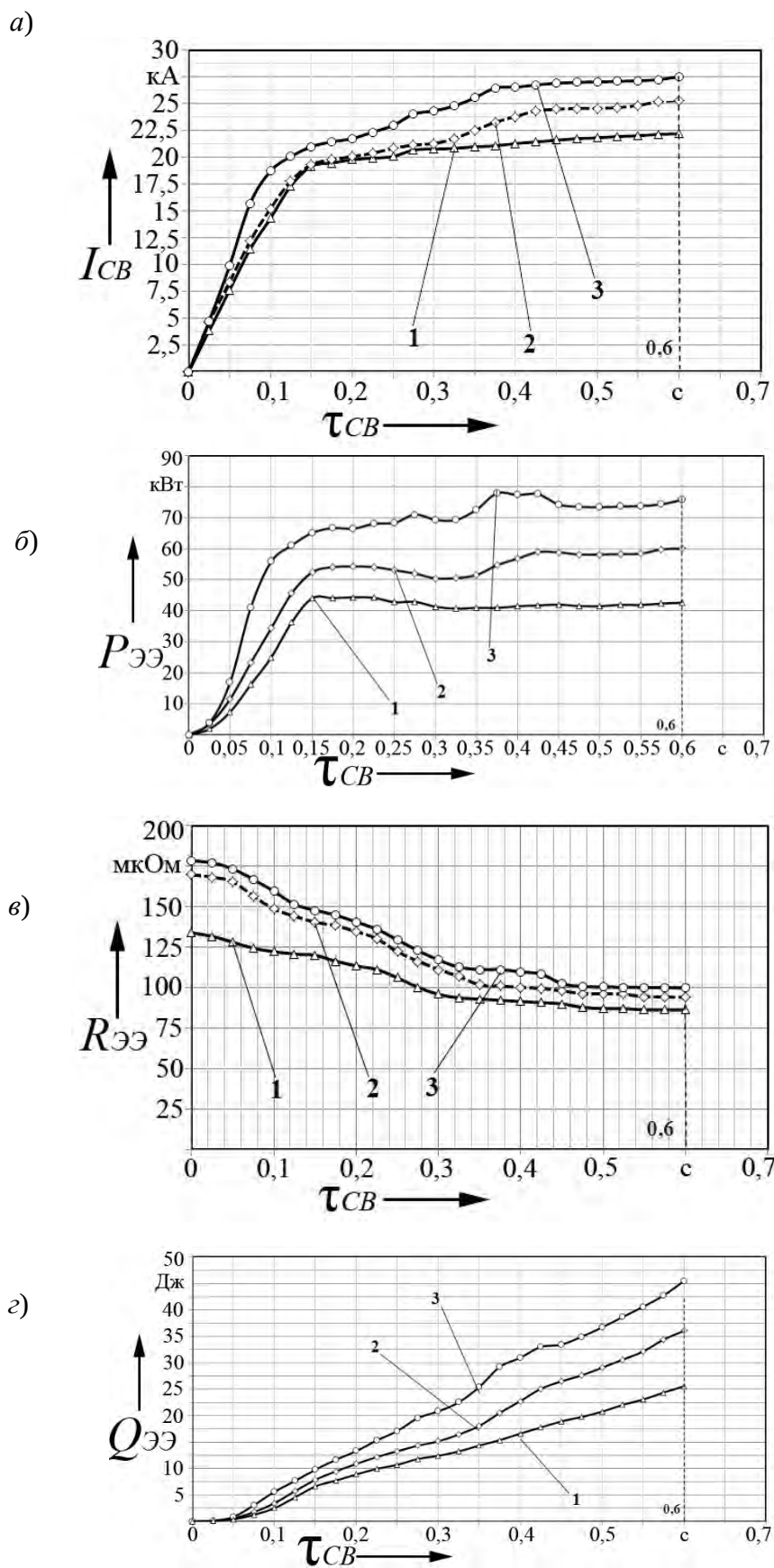
При экспериментах параметр I_{CB} на регуляторе цикла сварки РКС-801 задавался номерами позиции «НАГРЕВ».

Было установлено, что увеличение параметра I_{CB} относительно оптимального значения (позиция «1» в данном случае) приводит не только к росту максимального значения тока в момент его выключения на 8...10 % (2500...5000 А), но и к увеличению крутизны нарастания импульса начиная с первых 3...4 периодов сварки (см. рисунок 3.22, *а*). Это ведет к увеличению начального значения параметра $P_{\Sigma\Sigma}$ на 30...35 % (см. рисунок 3.22, *б*) при относительной неизменности параметра $R_{\Sigma\Sigma}$ (см. рисунок 3.22, *в*). В результате происходит соответствующий рост параметра $Q_{\Sigma\Sigma}$, и при его росте относительно оптимального значения (в данном случае 550...600 Дж) на 25...30 % в первые 2...3 периода сварки неизбежны выплески расплавленного металла или поры (позиция «2»). Уменьшение параметра I_{CB} снижает вводимую $Q_{\Sigma\Sigma}$ относительно оптимального значения (позиция «1») на 28...30 % (см. рисунок 3.22, *г*), в результате чего имеют место непровары (позиция «0»).

Последующая КРС образцов пакетных соединений с вариацией параметра I_{CB} относительно оптимальных значений позволила подтвердить установленные закономерности влияния режимов на параметры процесса и оценить возможность образования дефектов:

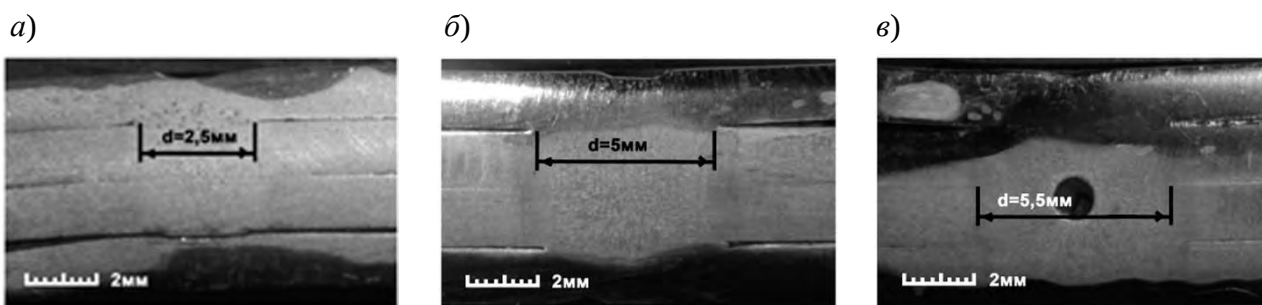
- на производстве положительные колебания сетевого напряжения, а также неточная настройка регулятора цикла сварки оператором, вызывающие превышение фактического I_{CB} на 10 %, а вводимой $Q_{\Sigma\Sigma}$ на 25...30 % относительно оптимальных значений (на рисунке 3.23, *б* изображено бездефектное соединение), в результате приводят к появлению дефектов типа «выплеск», сопровождающихся, как правило, порообразованием (рисунок 3.23, *в*);

- отрицательные колебания сетевого напряжения, а также неумышленное введение ферромагнитных масс в пространство вторичного контура сварочной машины, вызывающие уменьшение I_{CB} на 13...15 %, а вводимой $Q_{\Sigma\Sigma}$ на 28...30 % относительно оптимальных значений, приводят к появлению дефектов типа «непровар» (рисунок 3.23, *а*) [153].



1 – номер позиции «0»; 2 – номер позиции «1»; 3 – номер позиции «2»

Рисунок 3.22 – Влияние параметра I_{CB} на форму импульса (а), $P_{ЭЭ}$ (б), $R_{ЭЭ}$ (в) и $Q_{ЭЭ}$ (г)



$a - I_{CB} = 22 \text{ кА}$ (позиция «0»); $b - I_{CB} = 25,3 \text{ кА}$ (позиция «1») (оптимально);
 $v - I_{CB} = 27 \text{ кА}$ (позиция «2»)

Рисунок 3.23 – Влияние параметра I_{CB} на дефектность соединений (пакет из четырех деталей)

3.5 Анализ влияния центровочных отверстий в деталях на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС

Для выявления дополнительной возможности повышения энергоэффективности процесса КРС было предположено, что наличие в одной из свариваемых деталей отверстия диаметром $d_{отв}$, центрирующего рельеф другой детали, может увеличить значение параметра $R_{ээ}$ и тем самым интенсифицировать нагрев в контакте деталь–деталь межэлектродной зоны [51, 154].

Рассматривался процесс КРС соединений, состоящих из трех деталей и аналогичных рассматриваемым в подразд. 3.4, но с центровкой рельефов наружных деталей по отверстиям в центральной детали (рисунок 3.24).

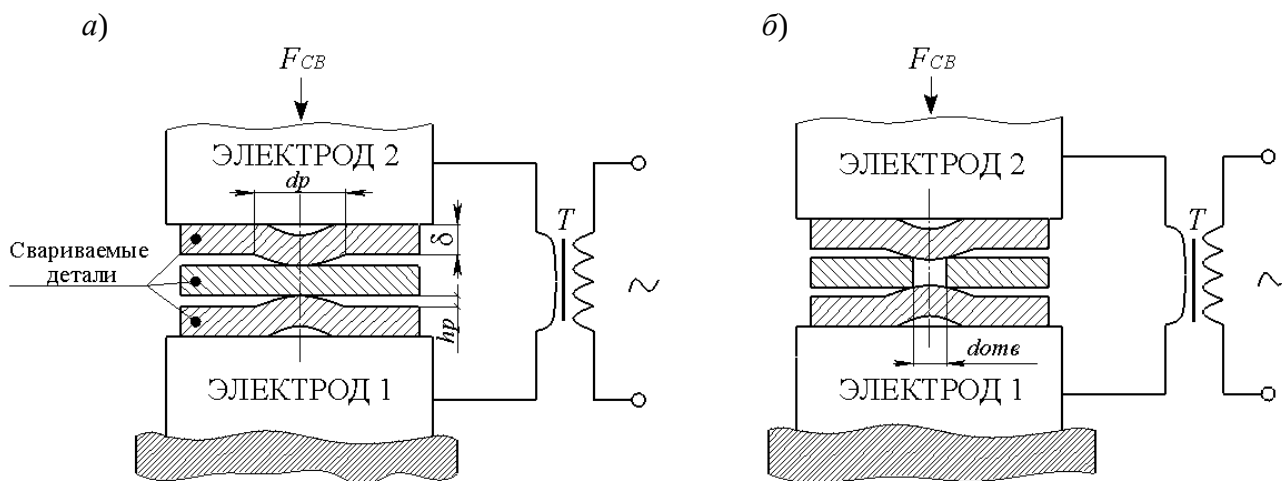


Рисунок 3.24 – Схемы расположения свариваемых деталей без центровки рельефов по отверстиям (а) и с центровкой (б)

Геометрические параметры рассматриваемых соединений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Геометрические параметры соединений с центровкой рельефов по отверстиям

Количество свариваемых деталей, шт.	Количество рельефов, шт.	Толщина деталей δ , мм	Диаметр рельефов d_P , мм	Высота рельефов h_P , мм	$d_{отв}$, мм			
3	3	2 + 2 + 2	4,75	1,12	1,5	2,0	2,5	3,0

Как для соединений без отверстий приняли $\tau_{CB} = 0,48$ с и $F_{CB} = 5,5$ кН по таблице 3.4.

Перед расчетом УТБ условно приняли $R_{ЭЭ} = 120...126$ мкОм, предположив, что значение несколько увеличится (в данном случае на 40...50 мкОм) по сравнению со сваркой соединений без отверстий ($R_{ЭЭ} = 80$ мкОм) в связи с уменьшенной начальной площадью контакта деталь–деталь (из-за наличия отверстий в центральной детали).

По УТБ рассчитали значения параметров $Q_{ЭЭ}$ и I_{CB} по обычной методике, приведенной в подразд. 1.3 (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Результаты расчета УТБ для КРС соединений по центрирующим отверстиям

$d_{отв}$, мм	τ_{CB} , с	$Q_{ЭЭ}$, Дж	$R_{ЭЭ}$, мкОм	I_{CB} , кА
–	0,48	26979	80	26,5
1,5		26851	120	21,6
2,0		27386	123	21,5
2,5		27680	125	21,5
3,0		27672	126	21,4

Далее для проведения комплекса экспериментов в центральных деталях соединений предварительно сверлились центровочные отверстия указанных диаметров.

Параметры режима КРС, дополнительно задаваемые на регуляторе цикла сварки РКС-801 при экспериментах (см. подразд. 1.3): $\tau_{СЖ} = 0,6$ с (предварительное сжатие); $\tau_{ЛР} = 0,4$ с (проковка).

На экспериментальной установке (см. рисунок 2.39) для каждого значения $d_{отв}$ осуществили КРС десяти одинаковых образцов.

При этом в режиме реального времени зарегистрировали кривые изменения параметров I_{CB} , $R_{ЭЭ}$, $P_{ЭЭ}$, $Q_{ЭЭ}$ во времени (рисунки 3.25–3.28).

На рисунках 3.25–3.28 представлены кривые 1, 2, 3, 4 для соответствующих значений параметра $d_{отв}$, равных 1,5; 2; 3; 4 мм.

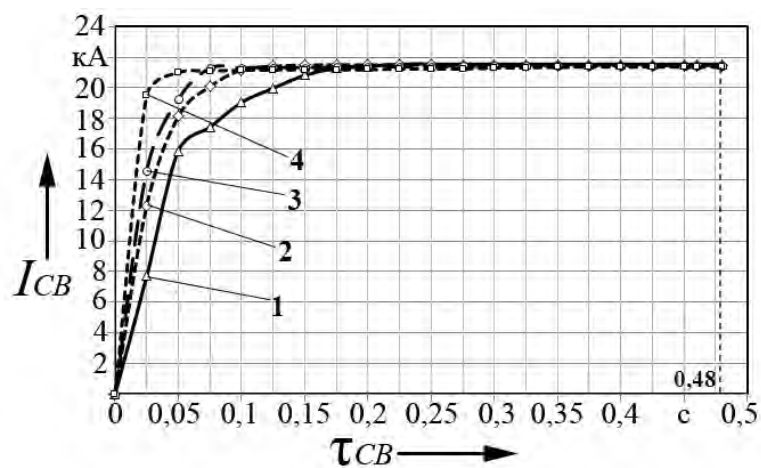


Рисунок 3.25 – Влияние диаметра центровочных отверстий на параметр I_{CB}

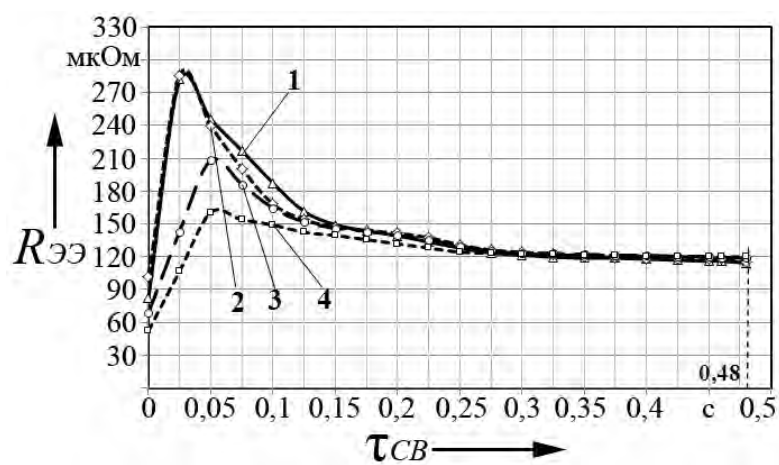


Рисунок 3.26 – Влияние диаметра центровочных отверстий на параметр $R_{ЭЭ}$

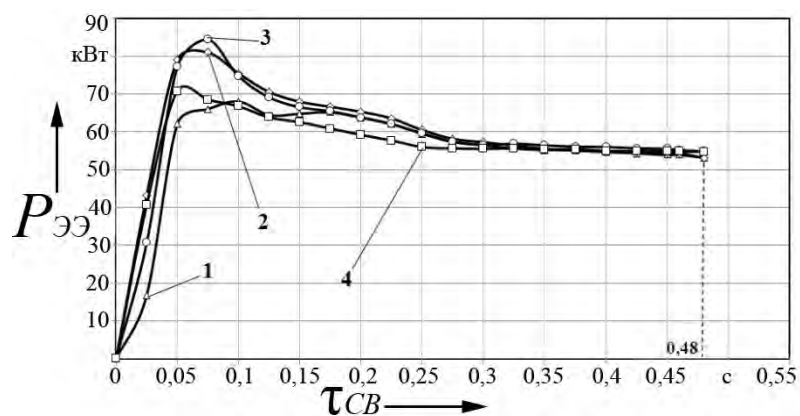


Рисунок 3.27 – Влияние диаметра центровочных отверстий на параметр $P_{ЭЭ}$

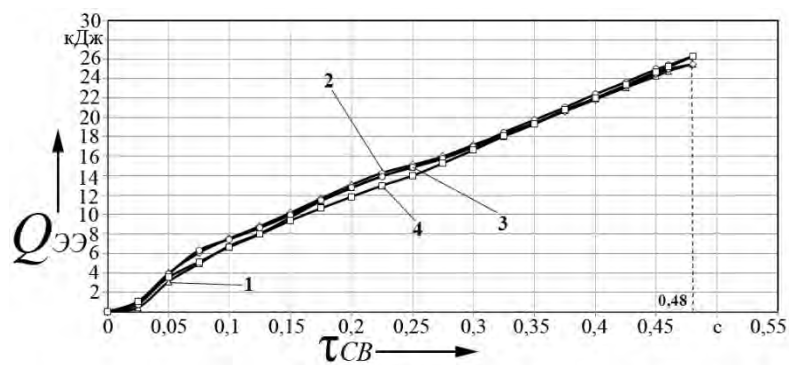
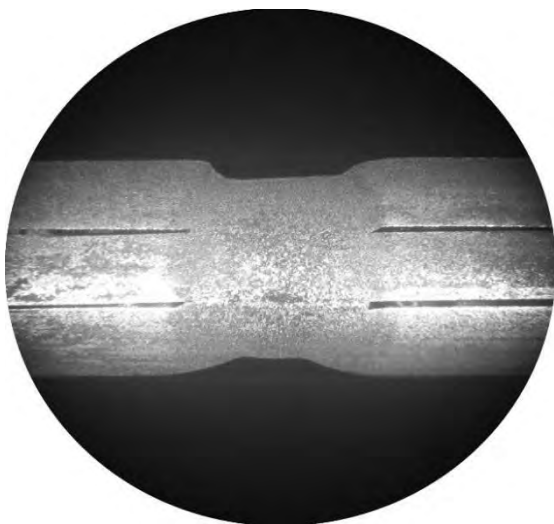


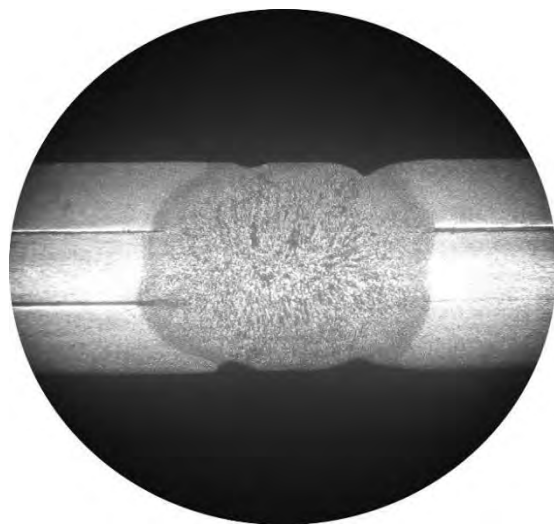
Рисунок 3.28 – Влияние диаметра центровочных отверстий на параметр $Q_{ЭЭ}$

Макрошлифы сварных соединений представлены на рисунке 3.29.

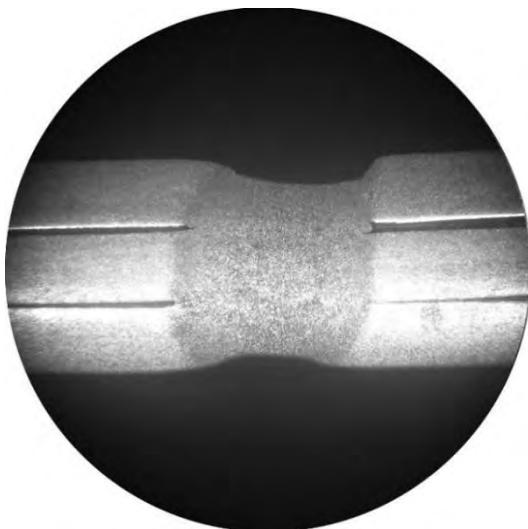
а)



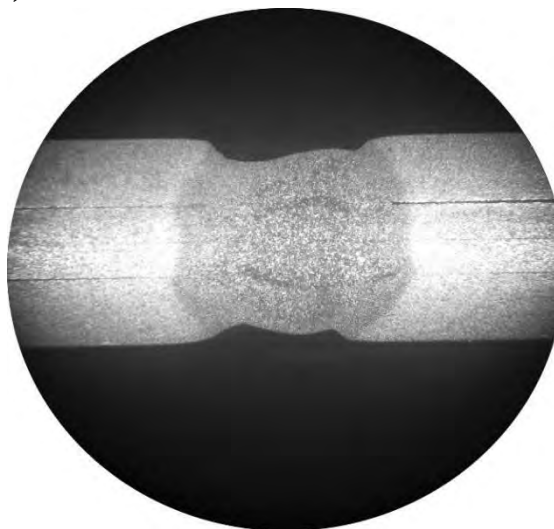
б)



в)



г)



а – $d_{OTB} = 1,5$ мм; б – $d_{OTB} = 2$ мм; в – $d_{OTB} = 2,5$ мм; г – $d_{OTB} = 3$ мм

Рисунок 3.29 – Макрошлифы ($\times 12$) сварных соединений при КРС с центровкой рельефов по отверстиям

Проведенные прочностные испытания сварных соединений статическим комбинированным нагружением на срез и изгиб показали, что оптимальный диаметр отверстия под центровку рельефов составляет 2 мм (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Влияние параметра $d_{отв}$ на прочность рельефных сварных соединений

Параметры	Диаметр отверстия $d_{отв}$, мм			
	1,5	2,0	2,5	3,0
Диаметр литого столбика $d_{ст}$, мм	4	5	3,0	3,5
Минимальное усилие разрушения (срез с изгибом) $P_{ср+изг}$, кН	27,5	33,85	28,7	29,6

Данные образцы выдержали максимальную нагрузку, равную 33,85 кН, что на 14,3 % превысило соответствующий показатель для образцов, сваренных без отверстий в промежуточной детали (29 кН).

В конечном счете добавление в соединение центровочных отверстий не изменило величину энергии, вводимой в межэлектродную зону, т. к. снижение требуемой величины сварочного тока на 18...20 % (с 26,5 до 21,5 кА) скомпенсировалось увеличением параметра $R_{ээ}$ на 34...36 % и в целом не изменило энергопотребления сварочной машины.

В результате можно сделать вывод о возможности применения при КРС центровочных отверстий под рельефы, но только с целью снижения мощности применяемой сварочной контактной машины.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы по третьему разделу монографии.

1 По принципу подобия установлена зависимость между количеством деталей нахлесточного рельефного соединения и длительностью протекания сварочного тока на основе анализа вводимой в межэлектродную зону энергии, затрачиваемой, с одной стороны, на нагрев и плавление центрального столбика металла и, с другой стороны, на тепловые потери, которая позволяет рассчитывать параметры режима сварки и в заводских условиях сваривать за один цикл соединения, состоящие из 2...5 деталей из низкоуглеродистой стали толщиной от 1 до 5 мм без наличия дефектов со стабильной прочностью и возможностью учета количества и формы выштампованных рельефов (зависимость установлена на базе уравнения теплового баланса, приведенного в литературе по контактной сварке).

2 Электротермодеформационные картины, а также кривые перемещения и скорости перемещения подвижного электрода, полученные при конечно-элементном моделировании процесса КРС нахлесточных соединений в среде MSC.MARC, позволили установить и описать пять этапов кинетики их формирования (подробный анализ этапов представлен в подразд. 3.3



монографии). Проведенный анализ позволил установить, что регулируемый ввод энергии в межэлектродную зону на втором, третьем и четвертом из пяти основных этапов кинетики формирования соединений позволяет устранить скачкообразное снижение сопротивления этой зоны в первые 3...4 периода от момента включения тока и преждевременную деформацию рельефа, благодаря чему большая часть вводимой энергии расходуется на полезный нагрев металла свариваемых деталей через достаточно плавно уменьшающуюся площадь контакта деталь–деталь вплоть до момента выключения тока.

3 Установлено, что на производстве при КРС положительные перепады сетевого давления и инерционность привода контактной машины, вызывающие превышение параметра F_{CB} на 10 % и уменьшение вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 18...20 % относительно оптимального значения, приводят к появлению дефектов типа «пора», отрицательные перепады сетевого давления, вызывающие уменьшение F_{CB} на 10 % и уменьшение вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 4...5 %, приводят к появлению дефектов типа «непровар».

4 Установлено, что на производстве при КРС положительные колебания сетевого напряжения, а также неточная настройка регулятора цикла сварки оператором, вызывающие превышение фактического I_{CB} на 10 %, а вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 25...30 % относительно оптимальных значений, в результате приводят к появлению дефектов типа «выплеск», сопровождающихся, как правило, порообразованием, отрицательные колебания сетевого напряжения, а также неумышленное введение ферромагнитных масс в пространство вторичного контура сварочной машины, вызывающие уменьшение I_{CB} на 13...15 %, а вводимой $Q_{ЭЭ}$ на 28...30 % относительно оптимальных значений, приводят к появлению дефектов типа «непровар».

5 Установлено, что при КРС нахлесточных соединений добавление центровочных отверстий под рельефы в целом не изменяет величины энергии, вводимой в межэлектродную зону, и, соответственно, энергопотребления сварочной машины, однако данный прием можно использовать с целью снижения мощности машины (при реализации более мягких режимов сварки).

4 Особенности формирования рельефных соединений с расплавлением металла деталей и без при пониженной энергоемкости процесса КРС

4.1 Процесс трехэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС засовов замков по круглым рельефам)

Три основных этапа кинетики формирования рельефных сварных соединений, определенные в результате конечно-элементного моделирования электротермодеформационного процесса КРС пакетов пластин (см. рисунок 3.18), в дальнейших исследованиях дали возможность выбрать количество ступеней импульса тока при первых попытках экспериментальной реализации энергоэффективной технологии КРС путем дозированного введения расчетной энергии в межэлектродную зону посредством ранее разработанной САУ КРС «Энергия» [51, 153].

На этапе 2, стартующем с момента включения тока, относительно небольшая требуемая величина перемещения подвижного электрода (0,15...0,2 мм), минимальные начальные площади контактов деталь–деталь, недопустимость преждевременной деформации рельефов, а также малый требуемый временной интервал стабилизации параметра $R_{\Sigma\Sigma}$ (0,06...0,08 с) в совокупности обуславливают необходимость уменьшения значения параметра I_{CB} в сравнении с расчетным по УТБ. При этом величины тока должно быть достаточно для ускорения активации контактных поверхностей, а также обеспечения температуры разупрочнения металла свариваемых деталей (более 800 К) и минимизации влияния его возможного теплового расширения на деформацию рельефов при нагреве. Сварочная машина МТ-3201, применяемая в экспериментах, на любой из восьми ступеней регулирования вторичного напряжения трансформатора обеспечивает минимальный ток в пределах 40...50 % от максимально возможного (на данной ступени). Поэтому на первой ступени импульса было принято решение задавать ток, равный 50 % от расчетного по УТБ (ток подогрева). Предполагалось, что в сравнении с обычным крутонарастающим импульсом такой величины тока будет достаточно для плавного нагрева рельефов, их медленной деформации и стабилизации параметра $R_{\Sigma\Sigma}$ на начальном этапе процесса КРС. Соответственно, было решено, что 5...10 % от величины энергии, рассчитанной по УТБ и необходимой для ввода в межэлектродную зону, будет достаточным для достижения вышеуказанных целей, особенно с учетом требования достаточной жесткости режима КРС.

На этапе 3, стартующем с момента резкого повышения параметра I_{CB} , для обеспечения процессов появления и роста зон взаимного расплавления металла

деталей, сопровождающихся интенсивной термопластической деформацией, величину тока необходимо повышать до максимальной, рассчитанной по УТБ (сварочный ток). Именно это позволит существенно увеличить скорость перемещения подвижного электрода с 1...2 до 35...65 мм/с (установленной при моделировании), обеспечить увеличение площадей контактов деталь–деталь и стабилизировать процессы электро- и теплопередачи в них и в металле свариваемых деталей. Было предположено, что на данном этапе с учетом требования достаточной жесткости режима энергия, вводимая в межэлектродную зону, должна составлять не менее 75...90 % от расчетной по УТБ.

На этапе 4, стартующем с момента резкого уменьшения параметра I_{CB} , для предотвращения шунтирования линий протекания тока по контактам деталь–деталь, не участвующим в сварке (при преждевременном касании свариваемых деталей), ток необходимо понижать. При этом момент понижения тока в импульсе со второй на третью ступень должен обеспечивать уменьшение скорости перемещения подвижного электрода до нуля, а дальнейшее протекание третьей ступени импульса вплоть до момента выключения тока обеспечит своеобразную термообработку зоны сварки для снижения вероятности образования в ней закалочных структур и минимизации остаточных напряжений. Момент выключения третьей ступени импульса тока должен свидетельствовать о достижении энергией, вводимой в межэлектродную зону, требуемого значения. Ожидалось, что для решения поставленных задач достаточно будет величины тока (термообработки), равной величине току подогрева на этапе 2. Соответственно, 5...10 % от величины энергии, рассчитанной по УТБ и необходимой для ввода в межэлектродную зону, также будет достаточным для достижения вышеуказанных целей.

Таким образом, путем задания трехступенчатого импульса тока было принято решение в процессе КРС осуществлять поэтапный (дозированный) ввод энергии, рассчитанной по УТБ, в межэлектродную зону в следующих соотношениях (предлагаемый режим):

- ввод на первой ступени импульса 5 % от расчетной энергии током, равным 50 % от максимального (в соответствии с УТБ);
- ввод на второй ступени импульса 90 % от расчетной энергии максимальным током;
- ввод на третьей ступени импульса 5 % от расчетной энергии током, равным 50 % от максимального.

Далее рассматривался одноцикловой процесс КРС пакетных соединений засовов дверных замков производства ОАО «Могилевский завод «Строммашина» с годовой программой выпуска 180000 шт. (рисунок 4.1).

Засов является основным элементом дверного замка и конструктивно представляет собой неразъемное соединение, состоящее из четырех деталей:



ригеля в виде штампованной пластины толщиной 2,5 мм из низкоуглеродистой стали 08кп и трех стержней диаметром 12 мм из стали 35.



Рисунок 4.1 – Дверные замки сувальдного типа производства ОАО «Могилевский завод «Строммашина»

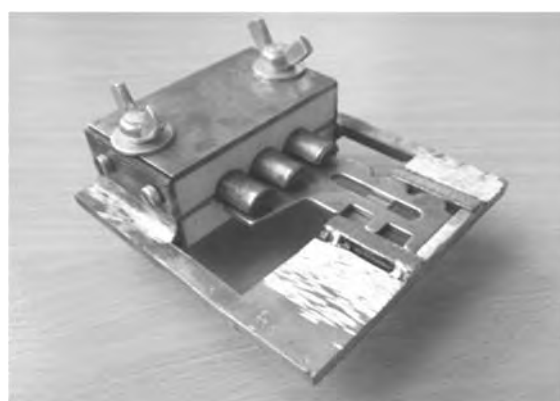
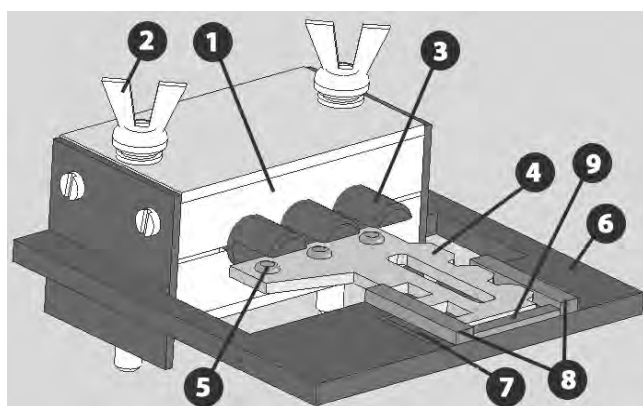
После штамповки ригеля (при его изготовлении) на его поверхности были предусмотрены три круглых выштампованных рельефа габаритами $5 \times 1,3$ мм.

Один из концов каждого стержня имел проточенную площадку для позиционирования рельефов ригеля при КРС.

Конструкция деталей засова, зафиксированных в сборочно-сварочном приспособлении, представлена на рисунке 4.2.

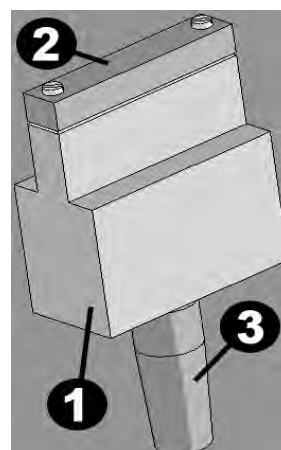
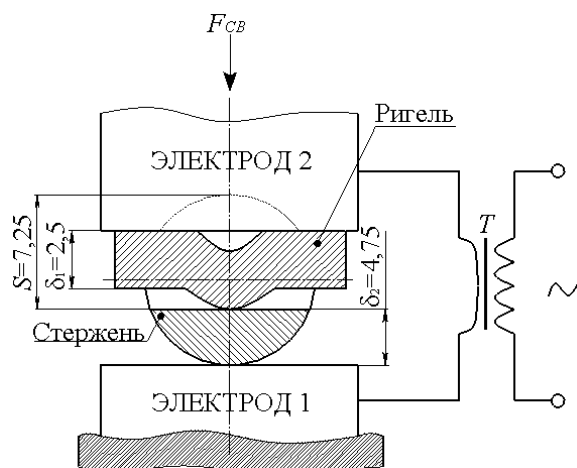
Схема взаимного расположения ригеля и одного стержня, а также составные электродные узлы для КРС засова приведены на рисунке 4.3.

Для данного случая КРС составлялась схема расчета УТБ (рисунок 4.4).



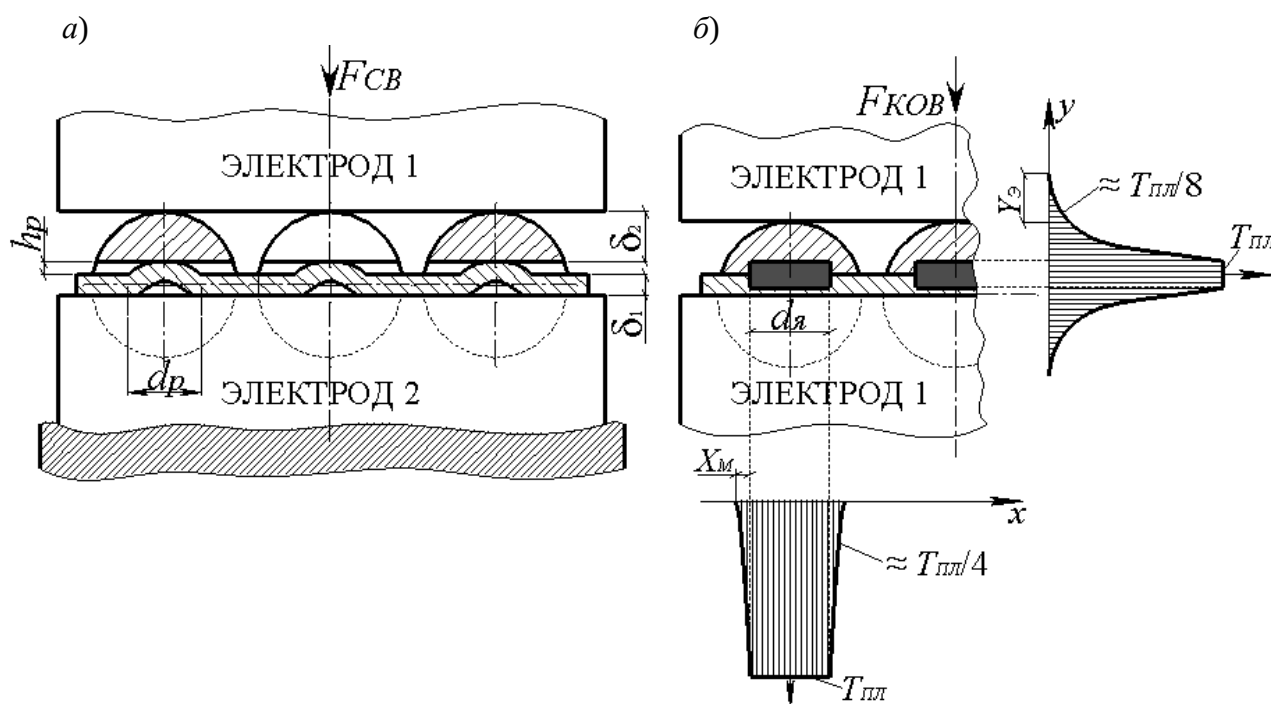
1 – фторопластовый позиционер; 2 – шпилька; 3 – стержень засова; 4 – ригель засова; 5 – рельеф; 6 – основание приспособления; 7 – магнитный фиксатор; 8 – направляющие планки; 9 – упорная планка

Рисунок 4.2 – Детали засова в сборочно-сварочном приспособлении



1 – бронзовая насадка; 2 – медная накладка (66×11×20 мм); 3 – электрод с конической поверхностью

Рисунок 4.3 – Схема взаимного расположения ригеля и одного стержня и составные электродные узлы для КРС засова



а – геометрия деталей засова перед сваркой; б – схема расчета УТБ при КРС пакетного соединения деталей засова

Рисунок 4.4 – Расчетные схемы сварного соединения засова

По УТБ на основе известных теплофизических характеристик материалов деталей засова (сталь 08кп; сталь 35) и накладок электродных узлов (медь М1), рекомендуемых значений длительности протекания тока и усилия сжатия электродов для КРС схожих толщин [1, 4], а также экспериментально определенной величины сопротивления межэлектродной зоны в момент выключения тока ($R_{\text{ЭЭ}} = 80 \text{ мкОм}$) были определены основные параметры режима КРС рассматриваемых соединений, который в дальнейшем принимался за базовый: $\tau_{\text{СВ}} = 0,45 \text{ с}$; $I_{\text{СВ}} = 25,3 \text{ кА}$; $F_{\text{СВ}} = 7 \text{ кН}$; $Q_{\text{ЭЭ}} = 21 \text{ кДж}$ [155].

Затем на машине МТ-3201 с регулятором цикла сварки РКС-801, задающим обычный (крутонарастающий) импульс тока, были произведены КРС засовов на базовом режиме и прочностные испытания полученных сварных соединений на статический срез (на универсальной испытательной машине МУП-50) (рисунок 4.5).

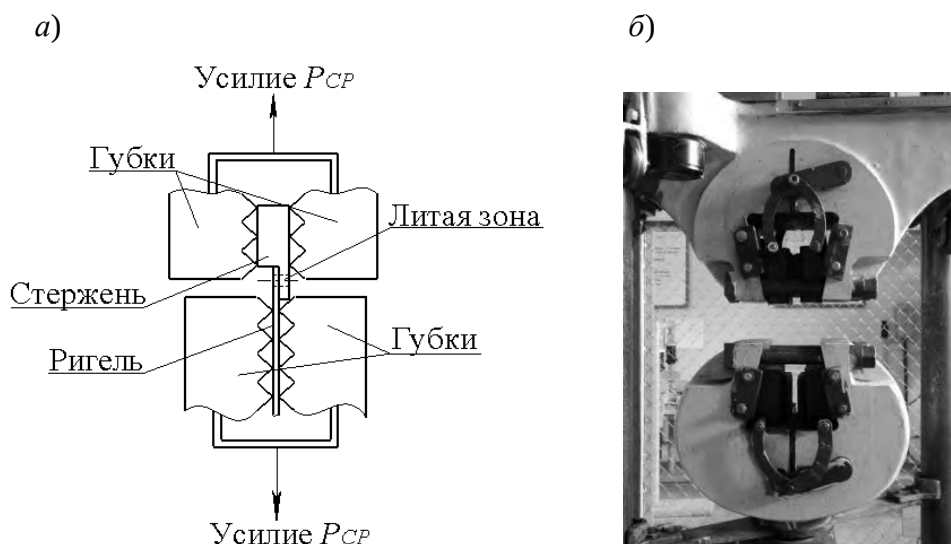


Рисунок 4.5 – Схема испытания сварного образца засова на статический срез (а) и универсальная испытательная машина МУП-50 (б)

Для девяти однотипных вырезанных образцов с одним стержнем среднее значение выдержанной нагрузки составило 10,24 кН, а диаметр литой зоны (ядра) – 6,94 мм. При этом разрушение всех образцов произошло срезом по литой зоне (рисунок 4.6).

При испытаниях на срез данные сварные соединения являлись односрезными [140] и фактические напряжения в них составляли около 281 Н/мм² (в сечениях литых зон). Для площадей поперечных сечений ригелей габаритами 15,5 × 2,5 мм, равных 38,75 мм², фактические напряжения основного металла составляли около 279 Н/мм² (при пределе прочности стали 08кп, равном 260...380 МПа) [156]. Для частей стержней, привариваемых к ригелю и имеющих площадь сечения 41 мм² (находилась как площадь сегмента круга), фактические напряжения основного металла составляли около 264 Н/мм². Таким

образом, при проведении прочностных испытаний фактические напряжения в основном металле ригелей и стержней оказались ниже, чем в литых зонах, вследствие чего разрушение произошло именно по литым зонам.



Рисунок 4.6 – Разрушенный образец после КРС на базовом режиме

После этого предварительно определили режим КРС засовов с подключением к сварочной машине САУ КРС «Энергия» и обеспечением трехступенчатого импульса тока, а также дозированным вводом в межэлектродную зону расчетной $Q_{ээ}$ (по УТБ) (рисунок 4.7).

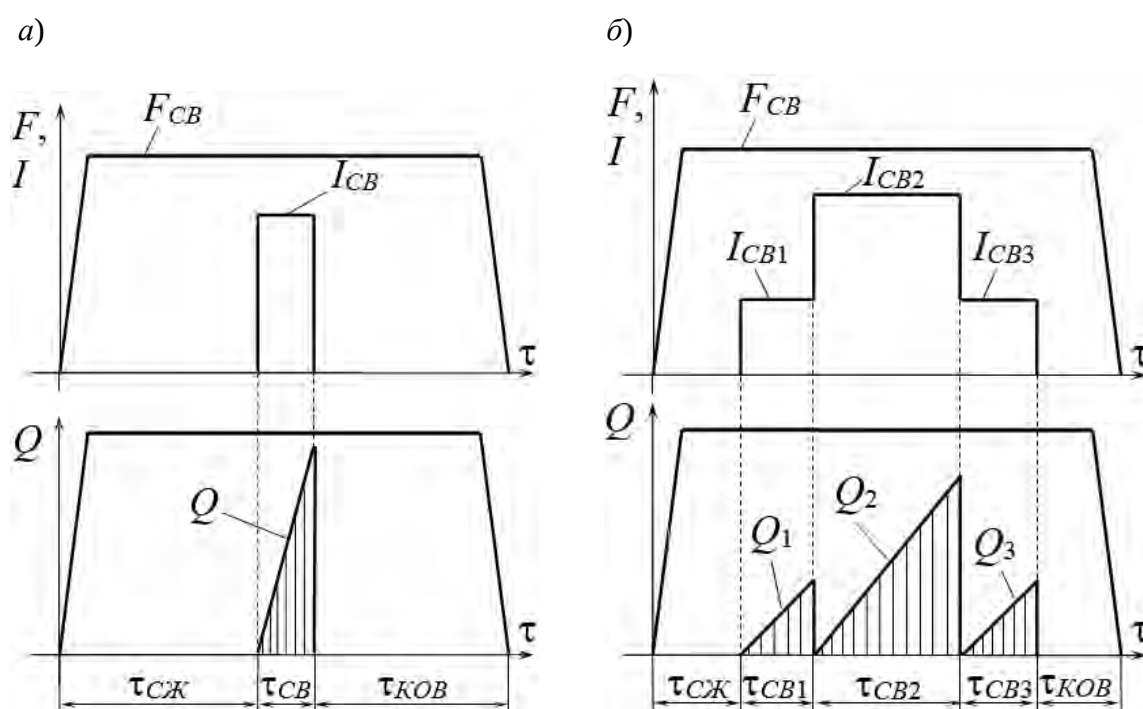


Рисунок 4.7 – Циклограммы процесса КРС засова на базовом (а) и предлагаемом (б) режимах

Был принят следующий режим КРС: $I_{под} = I_{то} = 12,65$ кА (50 % от расчетного тока); $I_{CB} = 25,3$ кА (расчетный ток); $\tau_{под} = \tau_{то} = 0,06$ с; $\tau_{CB} = 0,26$ с

(фактически определила САУ КРС «Энергия»); $F_{CB} = 7$ кН; $Q_{ПОД} = Q_{ТО} = 1050$ Дж (5 % от расчетной энергии); $Q_{CB} = 18,9$ кДж (90 % от расчетной энергии).

Затем был осуществлен ряд сварок засовов с умышленным уменьшением задаваемого в САУ КРС «Энергия» параметра $Q_{ЭЭ}$ относительно значений, соответствующих КРС на предлагаемом режиме, причем на каждой из трех ступеней импульса тока. В конечном счете суммарное расчетное значение $Q_{ЭЭ}$ уменьшили с 21 до 13,5 кДж, т. е. на 35 %. Это значит, что поэтапно ввод энергии уменьшили до 675 Дж на токах подогрева и термообработки (5 % от 13,5 кДж) и до 12,15 кДж на сварочном (максимальном) токе (90 % от 13,5 кДж). Фактическая длительность протекания такого трехступенчатого импульса тока составила $0,06 + 0,22 + 0,06$ с.

После сварки при прочностных испытаниях десять образцов из восемнадцати разрушились по основному металлу (пять образцов по металлу ригеля и еще пять – по металлу стержня), а остальные – срезом по литой зоне.

Минимальное разрушающее усилие при испытании сварных соединений на срез при дозированном трехэтапном введении в межэлектродную зону 13,5 кДж энергии составило 11 кН, т. е. не ниже, чем при базовом режиме КРС.

Разрушение некоторых образцов именно по металлу ригеля происходило ввиду того, что фактические напряжения в сечениях литых зон составляли около 253 Н/мм^2 (при диаметре зон 7,44 мм и усилии разрушения 11 кН), а в основных металлах ригеля и стержня 284 и 268 Н/мм^2 соответственно (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Разрушенный образец по металлу ригеля (предлагаемый режим КРС)

Разрушение некоторых образцов именно по металлу стержня объяснялось несколько сложнее. Фактические напряжения в сечениях литых зон составляли около 262 Н/мм^2 (при диаметре зон 7,04 мм и усилии разрушения 10,2 кН), а в основных металлах ригеля и стержня 263,2 и $248,8 \text{ Н/мм}^2$ соответственно. Таким образом, разрушение должно было происходить по основному металлу ригеля, однако фактически происходило по основному металлу стержня (рисунок 4.9).

Это объяснялось происходившими в этих случаях структурными изменениями в литой зоне и зоне термического влияния (далее – ЗТВ) при использовании предлагаемого режима КРС.



Рисунок 4.9 – Разрушенный образец по металлу стержня (предлагаемый режим КРС)

Макрошлифы и микрошлифы соединений засова при 10- и 200-кратном увеличении (край стержня при 20-кратном увеличении), полученные КРС на базовом (рисунок 4.10, а) и предлагаемом режимах (рисунок 4.10, б), показали, что применение ступенчатого импульса тока в комбинации с заданием уменьшенного количества энергии, вводимой в межэлектродную зону на каждом из участков импульса, как минимум не уменьшает ширину литой зоны и несколько стабилизирует процесс распределения тепла между стержнями, о чем свидетельствует форма литой зоны на макрошлифах [152].

При этом высокое содержание в стали 35 углерода до 0,4 % при КРС на базовом режиме (с крутонарастающим импульсом тока и интенсивным нагревом) приводит к образованию в части литой зоны, приходящейся на стержень (центр стержня на рисунке 4.10, а), закалочной структуры мартенситного типа [56], т. к. имеет место высокая скорость охлаждения литой зоны, превышающая критические значения. Структура основного металла стержня (верхний правый угол стержня на рисунке 4.10) – ферритно-перлитная мелкозернистая, в том числе при приближении к ЗТВ.

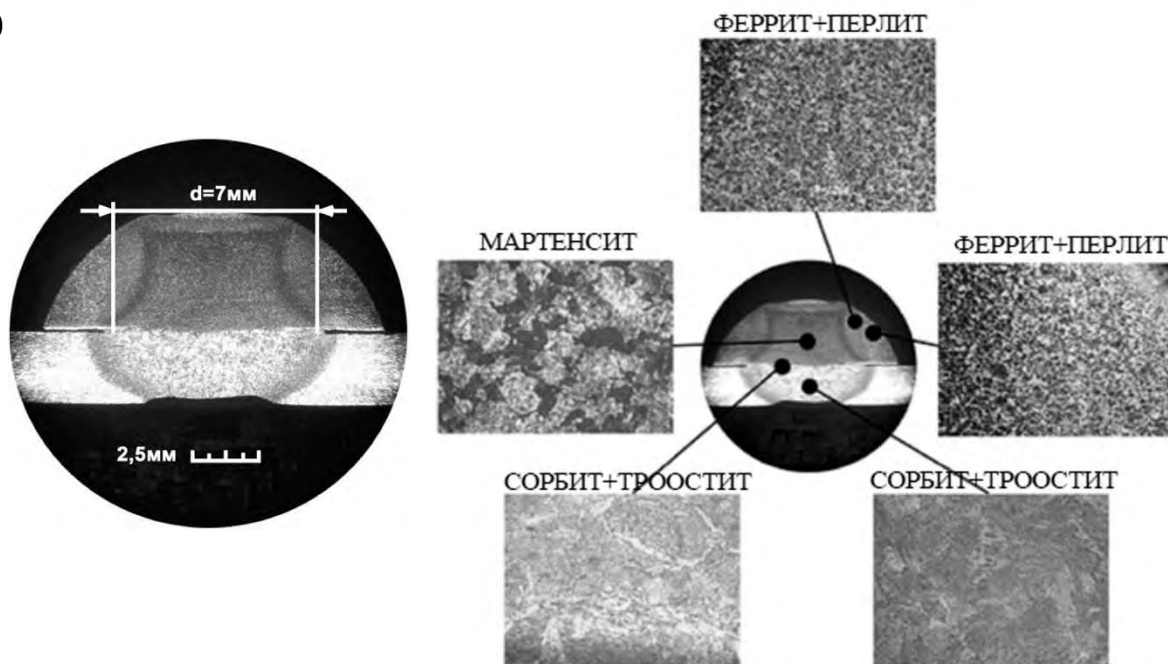
Предлагаемый режим КРС изменил циклограмму нагрева литой зоны и ЗТВ, а также характер их охлаждения. Предварительный и последующий подогревы металла свариваемых деталей токами $I_{под}$ и $I_{то}$ малой величины привели к замедлению скорости охлаждения литой зоны и ЗТВ. В итоге в стержне (центр стержня на рисунке 4.10, б) образовалась мартенситно-бейнитная структура. Структура основного металла стержня сохранилась феррито-перлитной, в том числе и при приближении к ЗТВ, но размер зерна феррита увеличился на 1...2 балла.

Уменьшение суммарной длительности протекания тока с 0,45 до 0,34 с не привело к изменению ширины ЗТВ и зоны сплавления, но форма части литой зоны, приходящейся на стержень, изменилась, что свидетельствует об увеличении объема расплавляемого металла стержня ввиду более эффективного использования энергии, вводимой в межэлектродную зону, для непосредственного формирования соединения при минимизации энергии тепловых потерь.

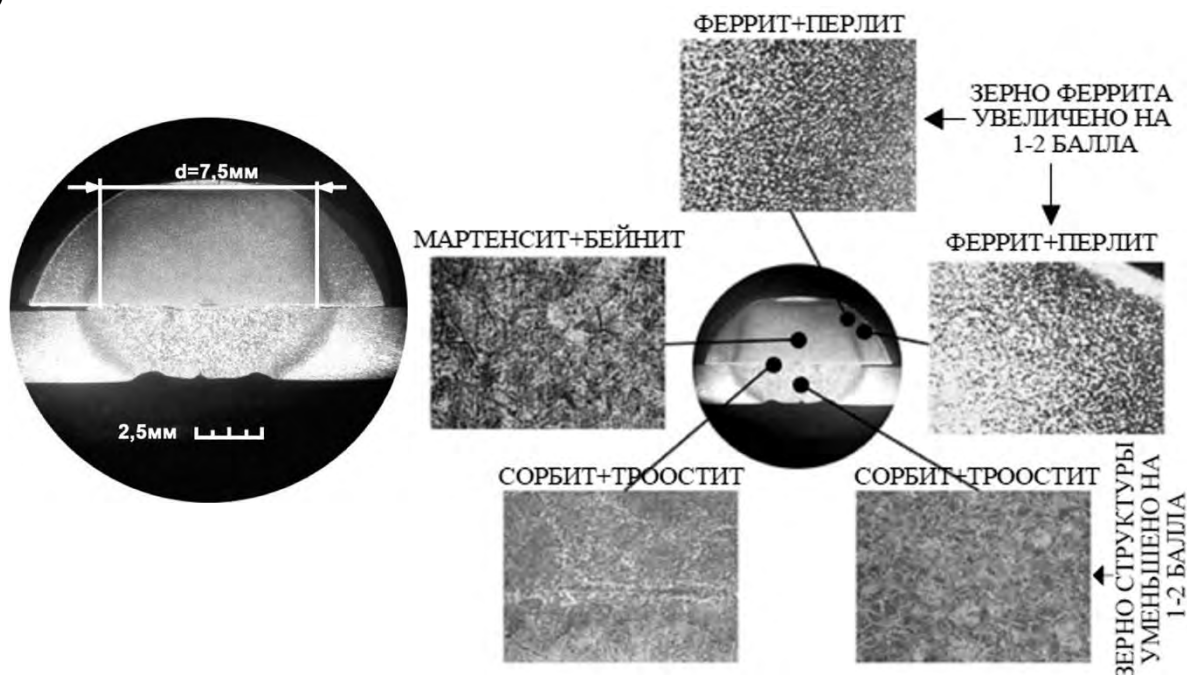
Таким образом, можно предположить, что разрушение некоторых образцов при КРС на предлагаемом режиме происходило именно по стержню ввиду увеличения размера зерна феррита около ЗТВ на фоне увеличения объема части

литой зоны, приходящейся на стержень и имеющей мартенситно-бейнитную структуру (измененную), а не ферритно-перлитную (исходную).

а)



б)



а – при КРС на базовом режиме; б – при КРС на предлагаемом режиме

Рисунок 4.10 – Шлифы сварных соединений засовов

Следует отметить, что применение нетипичной циклограммы нагрева металла свариваемых деталей засова не привело к изменению объема и размеров части литой зоны, приходящейся на ригель. При этом в процессе КРС в обоих случаях происходило науглероживание основного металла ригеля, в результате

чего часть литой зоны, приходящаяся на ригель, имела равномерную структуру сорбита с трооститом. Изменение характера нагрева привело к уменьшению размера зерна данной структуры на 1...2 балла (центр ригеля на рисунке 4.10).

В конечном счете при внедрении на ОАО «Могилевский завод «Строммашина» годовая экономия электроэнергии при производстве 180000 засовов составила около 1,3 МВт·ч [51].

4.2 Анализ влияния повышенного ковочного усилия, прикладываемого к электродам, на процесс КРС с трехэтапным дозированным введением энергии в межэлектродную зону

При осуществлении процесса КРС нахлесточных соединений по выштампованным рельефам одной из проблем, не связанных с прочностными показателями соединений, являются углубления на лицевых поверхностях деталей после сварки (вмятины). Например, при изготовлении кабин пассажирских лифтов способом КРС из листового металла толщиной 1,5...2 мм (нержавеющая сталь) к качеству лицевых поверхностей предъявляются повышенные эстетические требования, т. к. после сварки на стенках кабин вмятин не должно быть видно даже при боковом освещении.

Основной причиной появления таких вмятин является характер нагрева межэлектродной зоны в процессе КРС, в конечном счете влияющий на процессы деформирования и взаимодействия металлов рельефа и встречной детали.

С одной стороны, если процесс нагрева межэлектродной зоны осуществляется за счет крутонарастающего импульса тока завышенной величины, то перегрев металла в контакте деталь–деталь вблизи вершины рельефа происходит в первые несколько периодов сетевого напряжения, что приводит к выплеску, преждевременному закрытию начального зазора между деталями и формированию вмятины произвольной формы на лицевой поверхности детали с рельефом (от быстрого деформирования рельефа в обратную сторону). После этого металл рельефа, выдавленный в осевом направлении, касается электрода и начинает отводить к нему дополнительную энергию от свариваемых деталей. Об этом свидетельствуют цвета побежалости на этой вмятине после сварки. При этом металл встречной детали в результате перегрева также имеет после сварки цвета побежалости в контакте электрод–деталь, однако вмятина на лицевой поверхности этой детали имеет небольшие размеры, т. к. металл рельефа не успевает вступить во взаимодействие с металлом этой детали в полном объеме (по всему условному объемному столбику в соответствии с УТБ) и его вдавливание в сторону контакта деталь–деталь обусловлено усадкой при остывании.

С другой стороны, за счет более плавного, дозированного введения энергии в межэлектродную зону путем задания многоступенчатого импульса тока можно

добиться того, чтобы рельеф при нагреве деформировался направленно, преимущественно в сторону контакта деталь–деталь, интенсивно взаимодействуя с металлом встречной детали по всему условному объемному столбику. При этом часть металла рельефа, выдавливаемая в осевом направлении от контакта деталь–деталь, до момента выключения тока не коснется электрода и дополнительного (негативного) теплоотвода из межэлектродной зоны не произойдет, а в процессе КРС лунка от штамповки рельефа будет уменьшаться в размерах равномерно и концентрично относительно его оси, что в итоге обеспечит минимальный размер вмятины на лицевой поверхности детали (с рельефом) без наличия цветов побежалости. Однако на лицевой поверхности встречной детали в таком случае может образоваться небольшая выпуклость, если при КРС вершина рельефа, не достигнув температуры, близкой к температуре плавления металла, будет механически внедряться в тело этой детали.

При этом конечно-элементное моделирование процесса КРС по обычным циклограммам нагрева межэлектродной зоны крутонарастающим импульсом тока, позволяющее получать распределение температурных полей в контактах электрод–деталь в момент выключения тока, показывает, что температура поверхностных слоев свариваемого металла в центрах контактов может достигать 800...900 °С. В свою очередь, такие температурные условия приводят к тепловому расширению, разупрочнению и деформированию металла в центрах контактов, что в совокупности с усадкой литого ядра при кристаллизации способствует появлению вмятин на лицевых поверхностях деталей (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Деформации лицевых поверхностей деталей, на которых перед процессом КРС был выштампован круглый сферический рельеф (нахлесточные соединения)

Следует отметить, что методы, направленные на уменьшение или исключение деформаций на лицевых поверхностях свариваемых деталей при КРС, в конечном счете должны обеспечивать в начале процесса сварки отсутствие

выплесков в контакте деталь–деталь, которые могут приводить к резкому сокращению объема расплавленного металла в зоне сварки и значительной его усадке при кристаллизации.

При этом применение нетипичных циклограмм нагрева межэлектродной зоны, характеризующихся ее менее интенсивным разогревом при сварке в сравнении с обычными циклограммами, необходимо совмещать с приемами, обеспечивающими повышение запаса прочности сварных соединений.

К таким приемам относится проковка межэлектродной зоны повышенным ковочным усилием со стороны электродов после выключения тока.

Рассматривался процесс КРС соединений, состоящих из двух пластин размерами 50×100 мм из низкоуглеродистой стали (08кп) толщиной $2,5 + 2,5$ мм, по двум круглым сферическим выштампованным рельефам габаритами $5 \times 1,2$ мм одновременно (рисунок 4.12) [157].

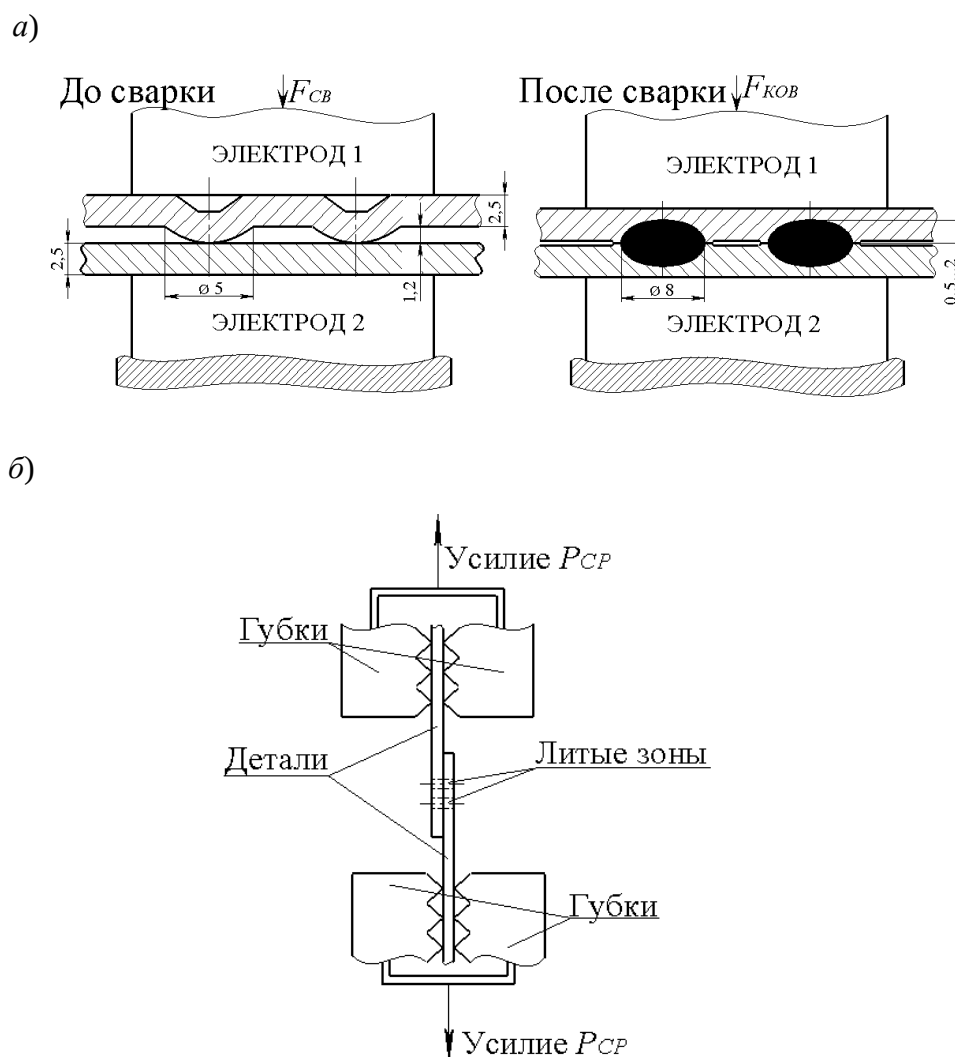


Рисунок 4.12 – Нахлесточное соединение пластин при КРС по паре рельефов одновременно (а) и схема его испытания на срез (б)

В соответствии с УТБ и [1] следующий режим КРС принимался за базовый: $\tau_{CB} = 0,32$ с; $I_{CB} = 26,3$ кА; $F_{CB} = F_{KOB} = 7$ кН; $\tau_{KOB} = 0,6$ с; $R_{ЭЭ} = 80$ мкОм (предварительно зарегистрировали экспериментально); $Q_{ЭЭ} = 15,6$ кДж; материал электродов – медь М1 (по циклограмме без приложения F_{KOB} в момент выключения тока).

В качестве предлагаемого использовался режим КРС с трехэтапным дозированным введением расчетной энергии (по УТБ) в межэлектродную зону путем задания трехступенчатого импульса тока (см. подразд. 4.1), но с приложением повышенного ковочного усилия $F_{KOB} = 25$ кН к межэлектродной зоне после выключения тока. При этом длительность запаздывания повышенного ковочного усилия при эксперименте составляла $\tau_{ЗАП} = 0,4$ с, а длительность его приложения варьировалась следующим образом: $\tau_{KOB} = 0,4$ с; $\tau_{KOB} = 0,8$ с; $\tau_{KOB} = 1,2$ с.

КРС производилась на экспериментальной установке (см. рисунок 2.39) с использованием САУ КРС «Энергия».

Первоначально предполагалось, что, с одной стороны, трехэтапный ввод энергии в межэлектродную зону позволит обеспечить нормированный диаметр литого ядра в соответствии с ГОСТ 15878–79 и, с другой стороны, приложение повышенного ковочного усилия после выключения тока даст возможность обеспечить прочность соединения при сниженном значении параметра $Q_{ЭЭ}$ относительно базового режима.

При эксперименте на соответствующих ступенях импульса тока в межэлектродную зону в три этапа последовательно вводили энергию в следующем соотношении (рисунок 4.13):

- токами подогрева I_{CB1} и термообработки I_{CB3} , равными 50 % (13 кА) от расчетного тока I_{CB2} , вводили по 5 % от расчетной энергии ($Q_1 = Q_3 = 0,78$ кДж);
- сварочным (расчетным) током $I_{CB2} = 26,3$ кА вводили 60 % от расчетной энергии ($Q_2 = 9,36$ кДж).

После этого на разрывной машине МУП-50 проводились прочностные испытания сварных образцов статическим нагружением на срез (нагрузку воспринимали обе точки одновременно).

В результате была построена аппроксимированная зависимость прочности сварного соединения на срез от длительности приложения повышенного ковочного усилия (рисунок 4.14).

Таким образом, применение предлагаемого режима КРС повысило требуемую прочность соединений на 16 % при уменьшении энергии, вводимой в межэлектродную зону, на 30 %. При этом увеличение длительности приложения повышенного ковочного усилия привело к некоторому снижению прочности

точек, т. к. механическое воздействие на них со стороны электродов осуществлялось после кристаллизации металла и в условиях повышенного теплоотвода (в электроды) из-за явления «вредной» заковки.

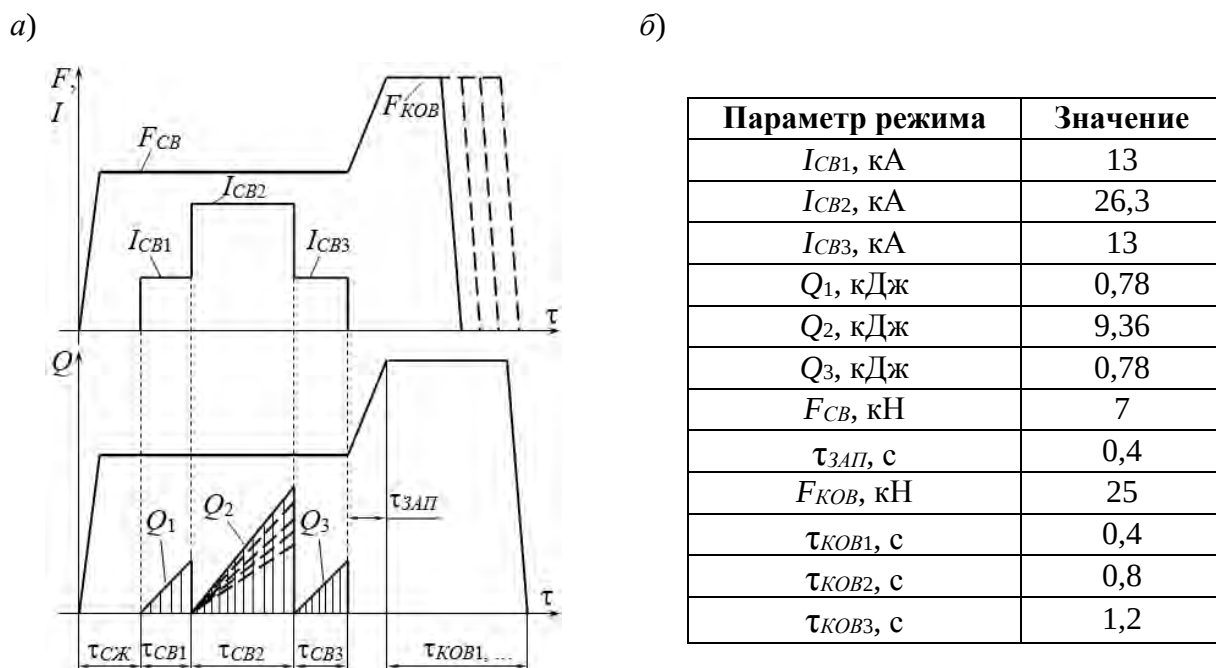


Рисунок 4.13 – Циклограмма (а) и параметры (б) предлагаемого режима КРС

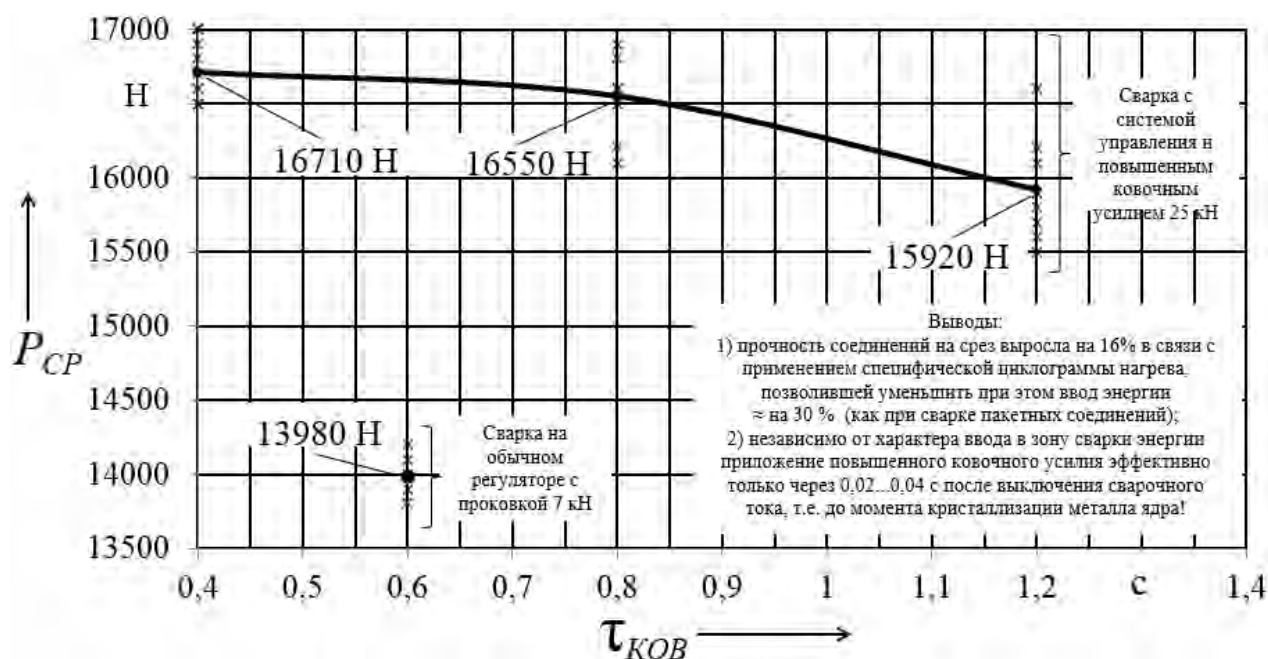


Рисунок 4.14 – Аппроксимированная зависимость прочности сварного соединения на срез от длительности приложения повышенного кованного усилия

Далее для установления зависимости прочности соединений на срез от количества поэтапно вводимой в межэлектродную зону энергии (по предлагаемой циклограмме нагрева) был осуществлен следующий эксперимент.

За базовый был принят следующий режим КРС с постоянным значением параметра $\tau_{КОВ}$ и трехэтапным введением в межэлектродную зону всей расчетной энергии в соотношении 5 % – 90 % – 5 %: $I_{CB1} = I_{CB3} = 13$ кА; $I_{CB2} = 26,3$ кА; $Q_1 = Q_3 = 0,78$ кДж (5 % от 15,6 кДж); $Q_2 = 14,04$ кДж (90 % от 15,6 кДж); $F_{CB} = 7$ кН; $F_{КОВ} = 25$ кН; $\tau_{КОВ} = 0,6$ с; $\tau_{ЗАП} = 0,4$ с.

Затем на этом режиме энергия, вводимая в межэлектродную зону, на всех ступенях импульса тока последовательно уменьшалась на 15, 30, 45 и 60 % соответственно и фактически составляла (при вводе поэтапно в джоулях):

- 1) 663 – 11934 – 663 ($Q_{ЭЭ} = 13,26$ кДж в сумме);
- 2) 546 – 9828 – 546 ($Q_{ЭЭ} = 10,92$ кДж в сумме);
- 3) 429 – 7722 – 429 ($Q_{ЭЭ} = 8,58$ кДж в сумме);
- 4) 312 – 5616 – 312 ($Q_{ЭЭ} = 6,24$ кДж в сумме).

По результатам эксперимента была построена зависимость прочности соединений от количества энергии, поэтапно вводимой в межэлектродную зону (рисунок 4.15). Также изготавливались и сопоставлялись макрошлифы сварных соединений с фотографированием на микроскопе НЕОРНОТ 21 и замером диаметра литого ядра.

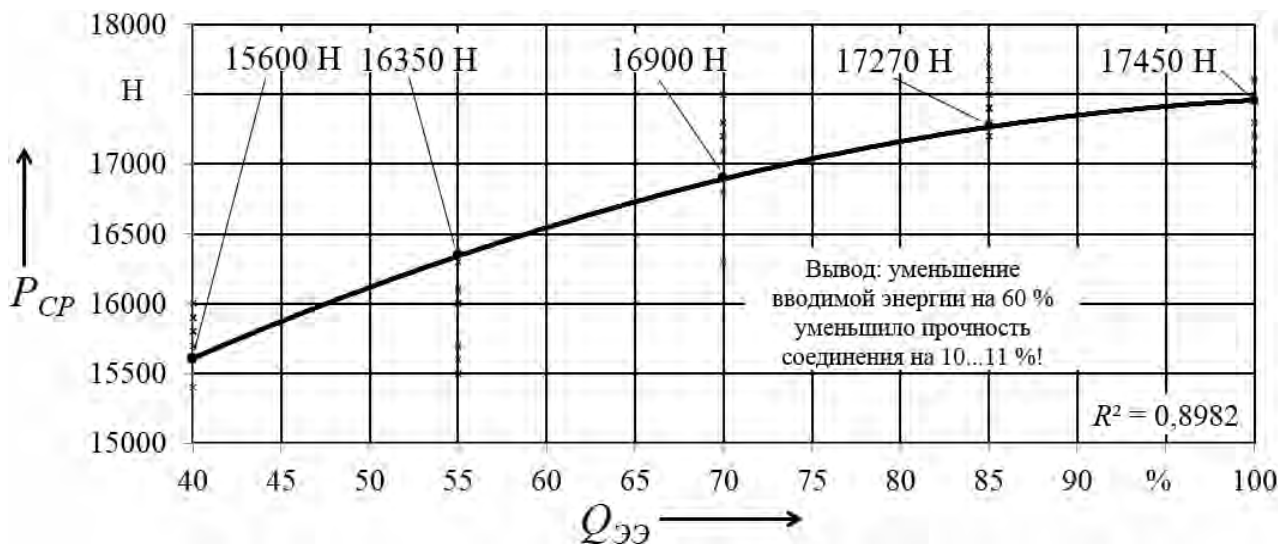


Рисунок 4.15 – Аппроксимированная зависимость прочности соединений на срез от количества поэтапно вводимой в межэлектродную зону энергии

Таким образом, уменьшение энергии, вводимой в межэлектродную зону, на 60 % относительно расчетного значения по УТБ (15,6 кДж) привело к уменьшению прочности соединения на срез лишь на 10...11 %, причем литое ядро сформировалось и его диаметр вошел в диапазон нормированных значений по ГОСТ 15878–79.

Однако в проведенном эксперименте приложение повышенного ковочного усилия происходило с большим запаздыванием по отношению к моменту выключения тока ($\tau_{ЗАП} = 0,4$ с), поэтому увеличение значения параметра $\tau_{КОВ}$ оказывало лишь негативное влияние на прочностные характеристики формируемых сварных соединений (см. рисунок 4.14).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что минимальное запаздывание приложения повышенного ковочного усилия после выключения тока может способствовать более интенсивной деформации рельефа на стадии проковки и этот эффект можно использовать с целью получения соединений в твердой фазе при дальнейшем уменьшении энергии, вводимой в межэлектродную зону при КРС (в перспективе).

Для проверки данного предположения были проведены еще два эксперимента.

В первом из них осуществлялась КРС двух пластин, аналогичных рассматриваемым, но по одному круглому выштампованному сферическому рельефу (по аналогии с рисунком 4.12).

За базовый принимался следующий режим КРС, соответствующий УТБ, рекомендациям [1] и обычной циклограмме процесса с приложением постоянного усилия сжатия электродов: $I_{CB} = 14,5$ кА; $\tau_{CB} = 0,32$ с; $\tau_{КОВ} = 0,6$ с; $F_{CB} = F_{КОВ} = 4,6$ кН; $Q_{ЭЭ} = 8$ кДж (по УТБ); материал электродов – медь М1.

Затем сваривали те же образцы, но с использованием САУ КРС «Энергия» на следующем предлагаемом режиме: $I_{CB1} = I_{CB3} = 7,25$ кА; $I_{CB2} = 14,5$ кА; $Q_1 = Q_3 = 0,4$ кДж (5 % от 8 кДж); $Q_2 = 14,04$ кДж (90 % от 15,6 кДж); $F_{CB} = 7$ кН; $F_{КОВ} = 17$ кН; $\tau_{ЗАП} = 0,4$ с. При этом параметр $\tau_{КОВ}$ варьировали, последовательно задавая равным 0,4; 0,8 и 1,2 с соответственно.

По результатам прочностных испытаний была построена зависимость прочности сварного соединения на срез от длительности приложения повышенного ковочного усилия (рисунок 4.16).

Анализ данной зависимости показал, что поэтапное введение энергии в межэлектродную зону в совокупности с приложением $F_{КОВ}$ сразу после выключения тока позволяет повысить прочность сварного соединения на 6...7 % при экономии электроэнергии, потребляемой контактной машиной, на 30 % в сравнении с КРС на базовом режиме, определяемом с учетом УТБ и рекомендаций из источников литературы. При этом увеличение значения параметра $\tau_{КОВ}$ с 0,4 до 1,2 с позволяет дополнительно повысить прочность сварного соединения на 4...5 %.

Во втором эксперименте осуществляли КРС соединений, аналогичных рассматриваемым, но с уменьшением энергии, вводимой в межэлектродную зону, на каждой из ступеней импульса тока.

За базовый был принят следующий режим КРС с постоянным значением параметра $\tau_{КОВ}$ и трехэтапным введением в межэлектродную зону всей расчетной энергии в соотношении 5 % – 90 % – 5 %: $I_{CB1} = I_{CB3} = 7,25$ кА; $I_{CB2} = 14,5$ кА;



$Q_1 = Q_3 = 0,4$ кДж (5 % от 8 кДж); $Q_2 = 7,2$ кДж (90 % от 8 кДж); $F_{CB} = 7$ кН; $F_{KOB} = 17$ кН; $\tau_{KOB} = 1,2$ с (F_{KOB} включалось сразу после выключения тока).

При КРС на этом режиме энергия, вводимая в межэлектродную зону на второй ступени импульса тока, последовательно уменьшалась на 5, 10, 20 и 30 % соответственно.

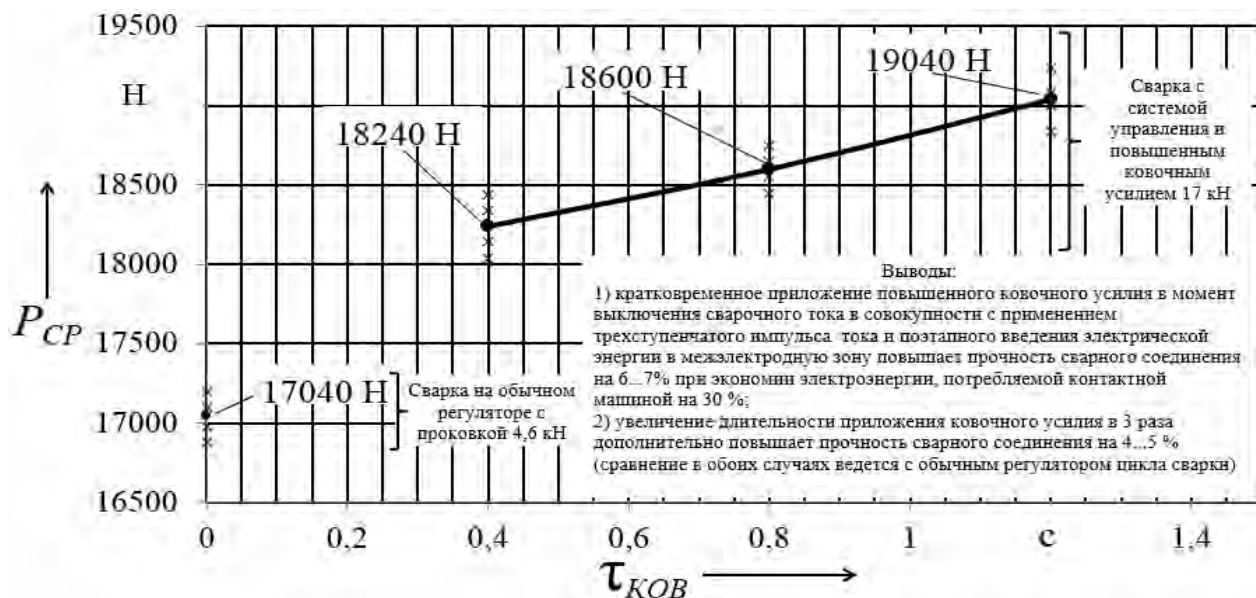


Рисунок 4.16 – Аппроксимированная зависимость прочности сварного соединения на срез от параметра τ_{KOB}

Было установлено, что при уменьшении энергии, вводимой в межэлектродную зону на второй ступени импульса, на 30 % прочность соединения обеспечивается, причем при исчезновении вмятины на лицевой поверхности детали без рельефа и существенном уменьшении вмятины на лицевой поверхности детали с рельефом (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Характер деформации лицевой поверхности детали без рельефа при КРС с уменьшением части расчетной энергии, вводимой на максимальном токе, на 5, 10, 20 и 30 % соответственно

Дальнейшее уменьшение энергии, вводимой в межэлектродную зону максимальным (расчетным) током, нецелесообразно, т. к. приводит к образованию твердофазных соединений без формирования зон взаимного расплавления металла деталей, характеризующихся пониженной прочностью.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе КРС применение трехэтапного дозированного введения в межэлектродную зону энергии, на 30 % меньшей в сравнении с расчетной по УТБ, путем задания трехступенчатого импульса тока в совокупности с приложением повышенного ковочного усилия в момент выключения тока позволяет исключить выплески расплавленного металла, которые могли бы привести к сокращению его объема в зоне соединения и значительной усадке при кристаллизации, что способствует уменьшению деформации и вмятины на лицевой поверхности детали с рельефом, а также преобразованию вмятины в выпуклость на лицевой поверхности детали без рельефа.

4.3 Процесс двухэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС кронштейнов лифтов по кольцевым рельефам)

Процесс КРС нахлесточных соединений по круглым выштампованным рельефам, наиболее часто применяемый в промышленности, относительно прост в изучении благодаря тому, что, как правило, детали имеют небольшие толщины (до 5 мм) и благоприятные условия теплопередачи в межэлектродной зоне, а также присутствуют высокие плотности тока в контактах деталь–деталь, имеющих относительно малые площади на протяжении всего процесса сварки. В совокупности эти факторы способствуют прогреву металла рельефов и встречных деталей с его интенсивным деформированием и образованием общих связей. Рассмотренный процесс КРС засовов замков, включающих детали разных марок сталей (сталь 08кп и сталь 35), осуществляемый по круглым выштампованным рельефам с применением типичной и нетипичной циклограмм нагрева металла межэлектродной зоны, является наглядным тому доказательством (см. подразд. 4.1).

Однако зачастую на заводах имеется необходимость соединения способом КРС деталей, имеющих высаженные или выштампованные кольцевые рельефы. Объем металла, описывающего такие рельефы, существенно выше, чем для круглых, ввиду чего увеличивается его требуемое теплосодержание (особенно при увеличении диаметров кольцевых рельефов или углов их наклона). При этом площади контактов деталь–деталь на протяжении всего процесса КРС существенно увеличиваются, что повышает теплоотвод в основной металл свариваемых деталей. Особые трудности возникают при сварке материалов с низкой теплопроводностью (нержавеющие стали), особенно при увеличении толщин

таких деталей. По этим причинам величина требуемой энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону (параметр $Q_{\text{ээ}}$), существенно повышается. В ряде случаев это приводит к невозможности использования имеющегося в наличии оборудования для КРС, т. е. сварочные машины не могут обеспечить требуемую мощность и усилие сжатия электродов (параметр $F_{\text{св}}$). Это, в свою очередь, вызывает потребность в разработке таких циклограмм нагрева межэлектродной зоны КРС, при которых металл рельефа и встречной детали в результате совместного деформирования будут образовывать достаточно прочное соединение при минимизации параметра $Q_{\text{ээ}}$, обеспечиваемого применяемой сварочной машиной.

В таких условиях при КРС применение трехэтапного ввода параметра $Q_{\text{ээ}}$ в межэлектродную зону становится неактуальным и использование двухступенчатого импульса тока является более приемлемым с точки зрения общих энергозатрат на процесс сварки.

Рассматривалась КРС кронштейнов лифтов Могилевского завода лифтового машиностроения (ОАО «Могилевлифтмаш») с годовой программой выпуска 200000 шт.

Кронштейн лифта представляет собой неразъемное соединение, состоящее из двух деталей:

- 1) круглая пластина толщиной 3 мм с наружным диаметром 64 мм и отверстием диаметром 10 мм посередине (материал – сталь 08кп);
- 2) спецболт под сварку М10×24 с кольцевым рельефом на нижней поверхности шляпки (материал – сталь 35).

Размеры кольцевого рельефа, определяемые удобством токарно-фрезерной обработки нижней поверхности шляпки болта: внутренний и наружный диаметры $d_{\text{вн}} = 11,6$ мм и $d_{\text{н}} = 16$ мм соответственно; высота $h_{\text{р}} = 1,1$ мм; рельеф остроугольный; угол подъема рельефа $\alpha = 45^\circ$ (рисунок 4.18).

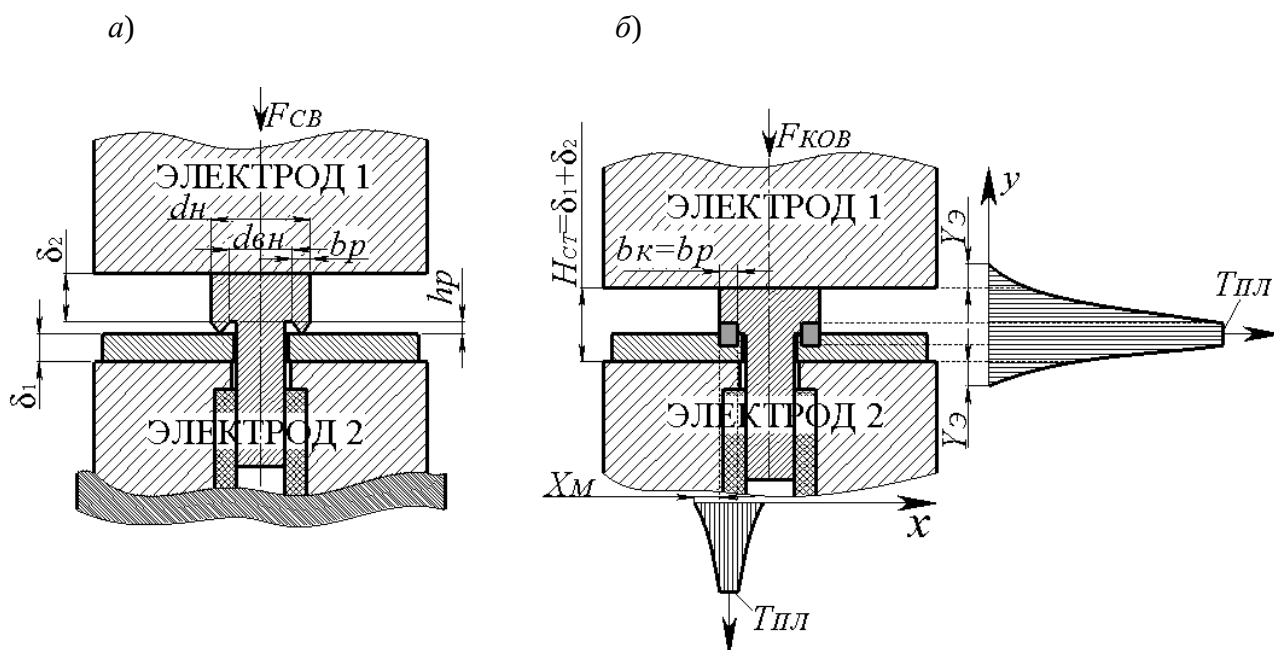


Рисунок 4.18 – Сварной кронштейн лифта (а), спецболт с кольцевым рельефом (б) и шляпки, имитирующие спецболт при первых экспериментах (в)

Сборка деталей кронштейна перед КРС осуществлялась путем укладки пластины на нижний электрод сварочной машины МТ-3201, имеющий

специальную фторопластовую вставку для последующего позиционирования болта (соосно отверстию в пластине) (см. рисунок 1.6).

Далее для такого случая КРС составлялось УТБ (рисунок 4.19).



а – геометрия деталей кронштейна перед сваркой; б – схема расчета УТБ при КРС соединения деталей кронштейна

Рисунок 4.19 – Расчетные схемы сварного соединения кронштейна

На основе известных теплофизических характеристик материалов деталей кронштейна (сталь 08кп; сталь 35) и электродов (медь М1), рекомендуемых значений параметров τ_{CB} и F_{CB} для КРС схожих толщин [1, 4], а также экспериментально определенной величины сопротивления межэлектродной зоны в момент выключения тока ($R_{ЭЭ} = 110$ мкОм), по УТБ с учетом последующей корректировки жесткости режима сварки в конечном счете были определены основные параметры режима КРС рассматриваемых соединений, который в дальнейшем принимался за базовый: $\tau_{CB} = 0,3$ с; $I_{CB} = 22$ кА; $F_{CB} = 5,5$ кН; $Q_{ЭЭ} = 12,3$ кДж [158].

Все последующие прочностные испытания сварных соединений кронштейнов на статическое продавливание (отрыв) производились на испытательной машине РГМ-1000-М-1 (рисунок 4.20).

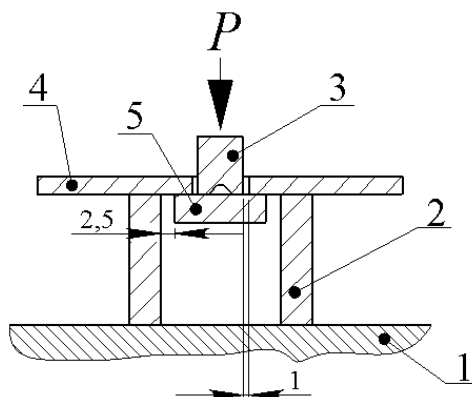
После этого с помощью регистратора сварочных процессов РКДП-0401, входящего в экспериментальную установку (см. рисунок 2.39), было определено минимальное количество энергии, которое САУ КРС «Энергия» может ввести в два этапа в межэлектродную зону при КРС кронштейнов с заданием двухступенчатого импульса тока (предлагаемый режим):

- минимальным током $I_{под} = 10$ кА, обеспечиваемым сварочной машиной на данной ступени регулирования вторичного напряжения трансформатора и принятым далее в качестве тока подогрева (45 % от расчетного тока);
- расчетным (сварочным) током $I_{св} = 22$ кА.

а)



б)



в)



1 – неподвижная плита; 2 – оправка; 3 – пуансон; 4 – пластина с отверстием; 5 – шляпка болта; P – усилие, прикладываемое к пуансону

Рисунок 4.20 – Испытательная машина РГМ-1000-М-1 (а), схема испытания кронштейнов на продавливание (б) и оправка с пуансоном (в)

Таким образом, было установлено, что:

- за 60 мс (возможный минимум, обеспечиваемый САУ КРС «Энергия») током подогрева в межэлектродную зону вводится около 780 Дж энергии. При возможном дальнейшем пропуске тока за каждый последующий период в среднем вводится около 285 Дж энергии;

- после подогрева расчетным (сварочным) током за один период сетевого напряжения в межэлектродную зону в среднем вводится около 1100...1150 Дж энергии. То есть при КРС кронштейнов данным током в межэлектродную зону с помощью САУ КРС «Энергия» можно ввести минимум 3300...3450 Дж энергии (см. подразд. 2.7).

Эксперимент показал, что САУ КРС «Энергия» при сварке кронштейнов лифтов двухступенчатым импульсом тока может ввести в межэлектродную зону минимальное количество энергии, равное 4080...4230 Дж.

В дальнейшем все попытки снижения значения параметра $Q_{ээ}$ относительно расчетного значения по УТБ (12,3 кДж) при КРС кронштейнов с САУ КРС «Энергия» осуществлялись с учетом исходного (минимально возможного) значения $Q_{ээ} = 4,08$ кДж (33 % от 12,3 кДж).

При этом часть энергии, вводимой током подогрева, не изменялась (0,78 кДж, или 6,3 % от расчетной энергии). Уменьшение значения параметра

Q_{Σ} относительно расчетного (11,52 кДж, или 93,7 % от расчетной энергии) производилось только на второй ступени импульса тока.

Таким образом, на машине МТ-3201 с регулятором цикла сварки РКС-801 была произведена КРС кронштейнов:

– на базовом режиме (по обычному крутонарастающему импульсу тока) (рисунок 4.21, а);

– на предлагаемом режиме с двухэтапным введением параметра Q_{Σ} в межэлектродную зону посредством САУ КРС «Энергия» (рисунок 4.21, б).

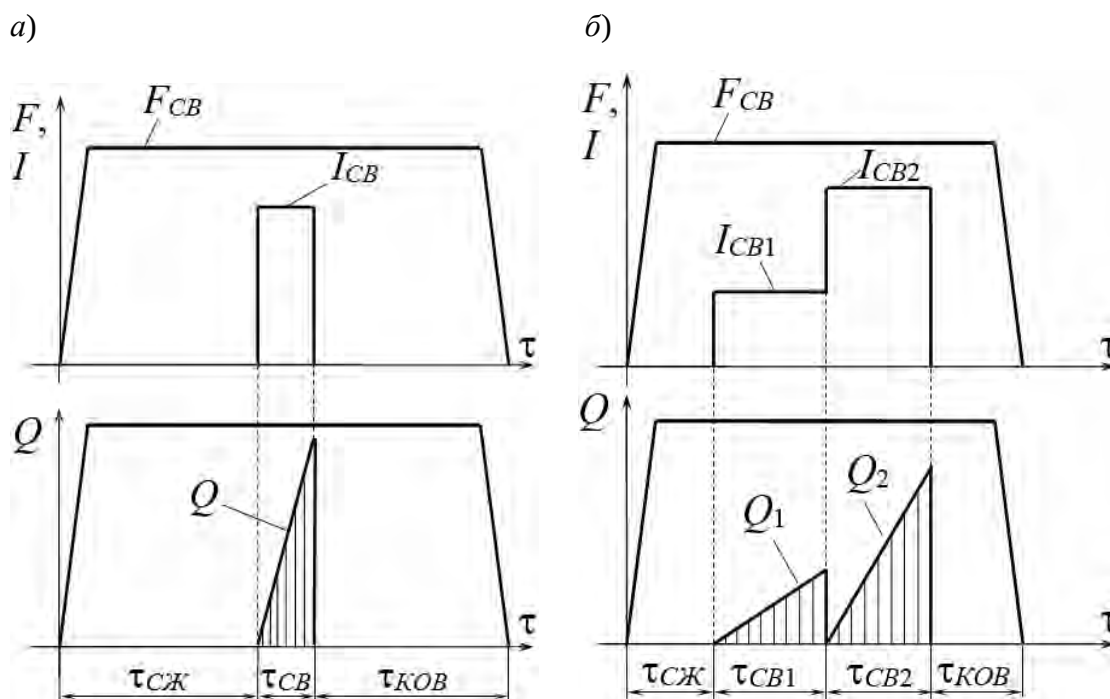


Рисунок 4.21 – Циклограммы процесса КРС кронштейна лифта на базовом (а) и предлагаемом (б) режимах

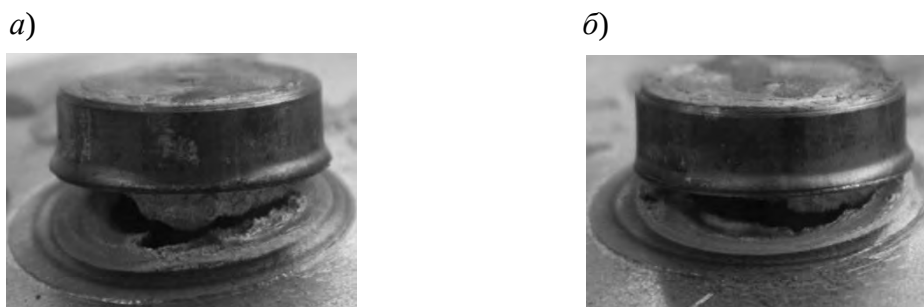
Для возможности обеспечения прочности кронштейнов, соответствующей разрушающей нагрузке не менее 20 кН, удалось снизить величину параметра Q_{Σ} на 15 % (энергия, вводимая на второй ступени импульса тока, снизилась с 11520 до 9675 Дж).

Фактическая длительность протекания двухступенчатого импульса тока, определенная САУ КРС «Энергия», составила $0,06 + 0,18$ с.

Разрушенные кронштейны представлены на рисунке 4.22.

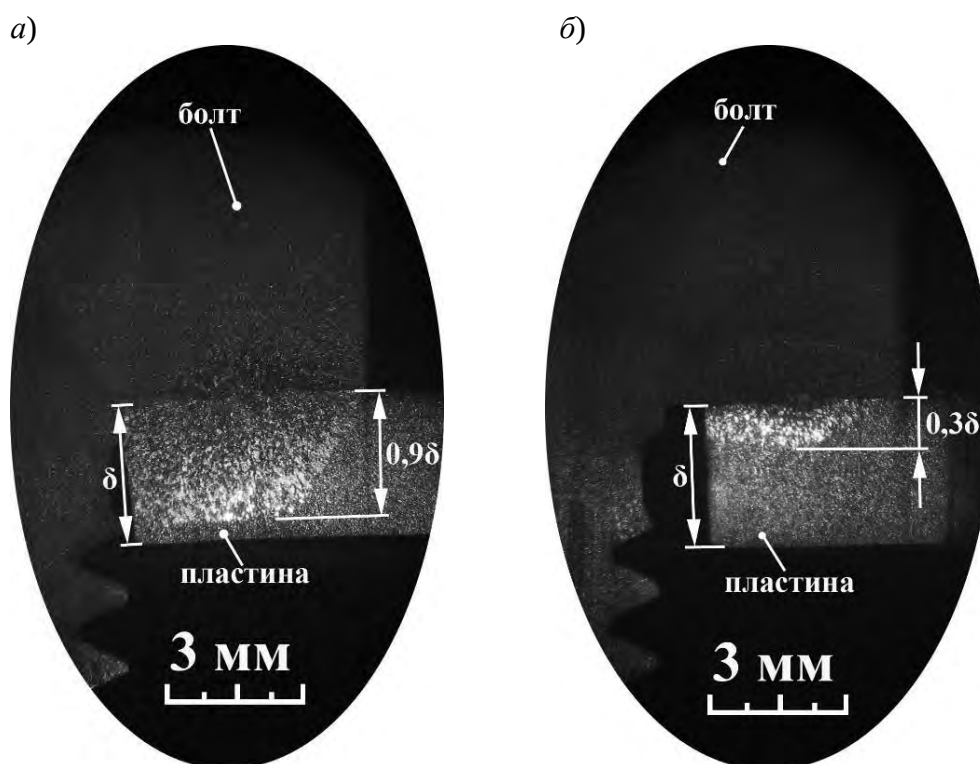
Характер разрушения образцов в обоих случаях – вязкий кольцевой вырыв по металлу рельефа, чередующийся с разрывами твердофазных зон.

Проведенная макрометаллография свидетельствует об уменьшении объема металла деталей, прогреваемого до высоких температур, но не участвующего в непосредственном образовании зон взаимного расплавления или твердофазных площадок в контакте деталь–деталь (рисунок 4.23).



a – после КРС на базовом режиме; *б* – после КРС на предлагаемом режиме

Рисунок 4.22 – Картины разрушения сварных кронштейнов



a – после КРС на базовом режиме; *б* – после КРС на предлагаемом режиме

Рисунок 4.23 – Макрошлифы сварных кронштейнов

4.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на процесс образования рельефных сварных соединений без расплавления

В процессе КРС некоторых конструкций обеспечение прочности рельефных сварных соединений на уровне 70...80 % от требуемой может быть приемлемым (даже для ответственных конструкций). Примером служит кузов легкового автомобиля, в котором пониженная прочность некоторых сварных точек

компенсируется их общим большим количеством и расположением на относительно малом расстоянии друг от друга.

Понижение прочности литых зон при КРС чаще всего является следствием нарушения технологии процесса сварки в вопросах выбора и соблюдения оптимальных параметров режима, прописанных в рекомендациях из источников литературы, а также результатом влияния возмущающих воздействий на межэлектродную зону при правильной настройке регулятора цикла сварки (параметры I_{CB} и τ_{CB}) и редуктора сварочной машины (параметр F_{CB}). При этом тепловой баланс межэлектродной зоны нарушается и на непосредственное формирование зон неразъемного сварного соединения, характеризующихся взаимодействием металла свариваемых деталей с образованием общих связей при расплавлении, фактически затрачивается значительно меньшая часть от величины расчетной энергии (параметра $Q_{ЭЭ}$ по УТБ). Энергия теплоотвода при этом повышается и при сварке металл в межэлектродной зоне не может достичь температуры, близкой к температуре плавления.

Несмотря на это, обоснованное уменьшение параметра $Q_{ЭЭ}$ относительно его расчетного значения по УТБ можно использовать для снижения энергоемкости процесса рельефной сварки в целом. Благодаря малым площадям контактов деталь–деталь и высоким плотностям тока в них электротермодеформационный процесс КРС в сравнении с процессом КТС всегда сопровождается повышенной радиально направленной пластической деформацией металла деталей, особенно при высоких значениях параметра F_{CB} и достаточной жесткости рельефов. Это дает возможность получения прочных общих связей металла свариваемых деталей без его расплавления (твердофазные соединения) при одновременном уменьшении параметра $Q_{ЭЭ}$ относительно его расчетного значения (по УТБ). При этом пониженной $Q_{ЭЭ}$ должно хватать, с одной стороны, для образования достаточно прочных связей и, с другой стороны, для обеспечения полного деформирования рельефов с минимизацией величины начального междетального зазора.

Теоретически добиться понижения значения параметра $Q_{ЭЭ}$ можно еще на стадии расчета УТБ, уменьшая параметр τ_{CB} относительно значения, принимаемого по рекомендациям из литературы. Такой подход приводит к уменьшению расчетной энергии тепловых потерь межэлектродной зоны при теплоотводе в основной металл свариваемых деталей и металл электродов (составляющие Q_M и $Q_{Э}$ параметра $Q_{ЭЭ}$). Однако становятся неизвестными температуры T_{OTB1} и T_{OTB2} металлов деталей и электродов при теплоотводе, и их нужно определять экспериментально с помощью термопар (что представляется возможным). При этом подразумевается, что в межэлектродную зону должно вводиться также и пониженное значение энергии, непосредственно затрачиваемой на полезный нагрев до конкретной температуры $T_{пол}$ определенного объема металла деталей будущей общей зоны соединения, т. к. расчет

составляющей $Q_{\text{Л}}$ параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$ производится только исходя из тепло-содержания этого объема металла. Экспериментальное определение значения этой температуры с помощью термопар трудноосуществимо из-за почти полного отсутствия доступа к контакту деталь–деталь, а конечно-элементное моделирование такого процесса дает недостоверные результаты.

В таких условиях было предложено рассчитывать значение параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$ по обычному УТБ с рекомендуемыми в литературе значениями $\tau_{\text{СВ}}$, $T_{\text{ПОЛ}}$ ($T_{\text{ПЛ}}$), $T_{\text{ОТВ1}}$ ($T_{\text{ПЛ}}/4$), $T_{\text{ОТВ2}}$ ($T_{\text{ПЛ}}/8$), а затем непосредственно в процессе КРС с помощью системы САУ КРС «Энергия» пытаться уменьшать это значение при одновременном стремлении к минимизации снижения прочности формируемых сварных соединений (без расплавления) за счет регулировки параметров $I_{\text{СВ}}$ или $F_{\text{СВ}}$ относительно их известных значений. Таким образом, в этом случае должно происходить уменьшение всего расчетного параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$, а не отдельных его составляющих.

Дополнительно для снижения уровня остаточных напряжений и частичной компенсации возможного падения прочности сварных соединений без расплавления было решено в момент выключения тока прикладывать к межэлектродной зоне повышенное ковочное усилие (далее – параметр $F_{\text{КОВ}}$).

Эксперименты с уменьшением значения параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$ относительно расчетного значения по УТБ при КРС производились по следующей методике.

1 На САУ КРС «Энергия» в программном коде среды LVW 2010 двумя частями задавалось расчетное значение $Q_{\text{ЭЭ}}$ (по УТБ), уменьшенное на определенный процент (применялся двухэтапный ввод $Q_{\text{ЭЭ}}$ в межэлектродную зону путем задания двухступенчатого импульса тока). При этом задаваемая энергия уменьшалась только на второй ступени импульса тока.

2 Непосредственно в процессе КРС параметры $I_{\text{СВ}}$ или $F_{\text{СВ}}$ варьировались относительно расчетных значений в стороны уменьшения или увеличения.

3 После сварки изготавливались и исследовались макрошлифы сварных соединений (на микроскопе НЕОРНОТ 21), а также производились их прочностные испытания на статический срез (на машине РГМ-1000).

Рассматривался процесс КРС нахлесточных соединений, состоящих из двух пластин толщиной 2 + 2 мм из низкоуглеродистой стали, по одному круглому выштампованному сферическому рельефу габаритами 6 × 1,2 мм (материал электродов – медь М1) (аналогичные соединениям, представленным в подразд. 2.7). Сварка производилась на машине МТ-3201.

Основные параметры базового режима КРС рассматриваемых соединений, рассчитанные по УТБ с учетом [1, 4, 45]: $\tau_{\text{СВ}} = 0,28$ с; $I_{\text{СВ}} = 16$ кА; $F_{\text{СВ}} = 3,6$ кН; $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН; $\tau_{\text{КОВ}} = 1,2$ с; $R_{\text{ЭЭ}} = 80$ мкОм; $Q_{\text{ЭЭ}} = 6,5$ кДж; материал электродов – медь М1 (по циклограмме с приложением $F_{\text{КОВ}}$ в момент выключения тока).

На предлагаемом режиме с помощью САУ КРС «Энергия» двухступенчатым импульсом тока в два этапа дозированно вводили в межэлектродную зону параметр $Q_{\text{ЭЭ}}$ в следующем соотношении:



1) на первой ступени импульса током подогрева $I_{\text{ПОД}} = 7,5$ кА (50 % от расчетного $I_{\text{СВ}}$) вводили 430 Дж энергии (6,6 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$), т. е. возможный минимум, обеспечиваемый системой (см. подразд. 2.7);

2) на второй ступени импульса расчетным (сварочным) током вводили энергию, последовательно уменьшаемую относительно расчетного значения (6070 Дж, или 93,4 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$).

После выключения тока к деталям также прикладывалось $F_{\text{КОВ}}$.

Дополнительно рассматривался режим КРС, параметры которого были заимствованы из [45] без расчетов по УТБ: $\tau_{\text{СВ}} = 0,28$ с; $I_{\text{СВ}} = 11,8$ кА; $F_{\text{СВ}} = 3,6$ кН; материал электродов – медь М1 (с включением $F_{\text{КОВ}}$ для адекватности сравнения всех режимов, представленных в эксперименте).

В результате было установлено, что среднее разрушающее усилие для сварных соединений составило:

а) 20 кН при КРС на базовом режиме с вводом 100 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$ (6,5 кДж) (ярко выражены цвета побежалости, характер разрушения – вязкий вырыв по основному металлу) (рисунок 4.24, а);

б) 14,5 кН при КРС на предлагаемом режиме с вводом 26 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$ (1,67 кДж) (срез по кольцу твердой фазы) (рисунок 4.24, б);

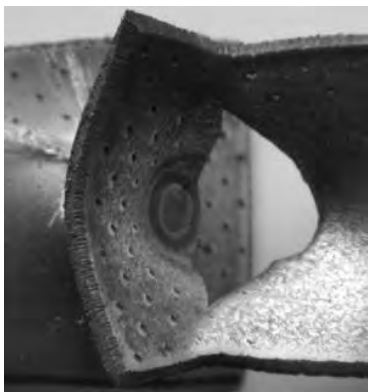
в) 18 кН при КРС на предлагаемом режиме с вводом 50 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$ (3,25 кДж) (вязкий вырыв по основному металлу, цвета побежалости отсутствуют) (рисунок 4.24, в);

г) 18,2 кН при КРС на предлагаемом режиме с вводом 57 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$ (3,7 кДж) (характер разрушения – как на рисунке 4.24, в);

д) 18,5 кН при КРС на предлагаемом режиме с вводом 64 % от расчетной $Q_{\text{ЭЭ}}$ (4,15 кДж) (характер разрушения – как на рисунке 4.24, в).

е) 16,4 кН при КРС на режиме, рекомендуемом в литературе (характер разрушения – как на рисунке 4.24, б).

а)



б)



в)

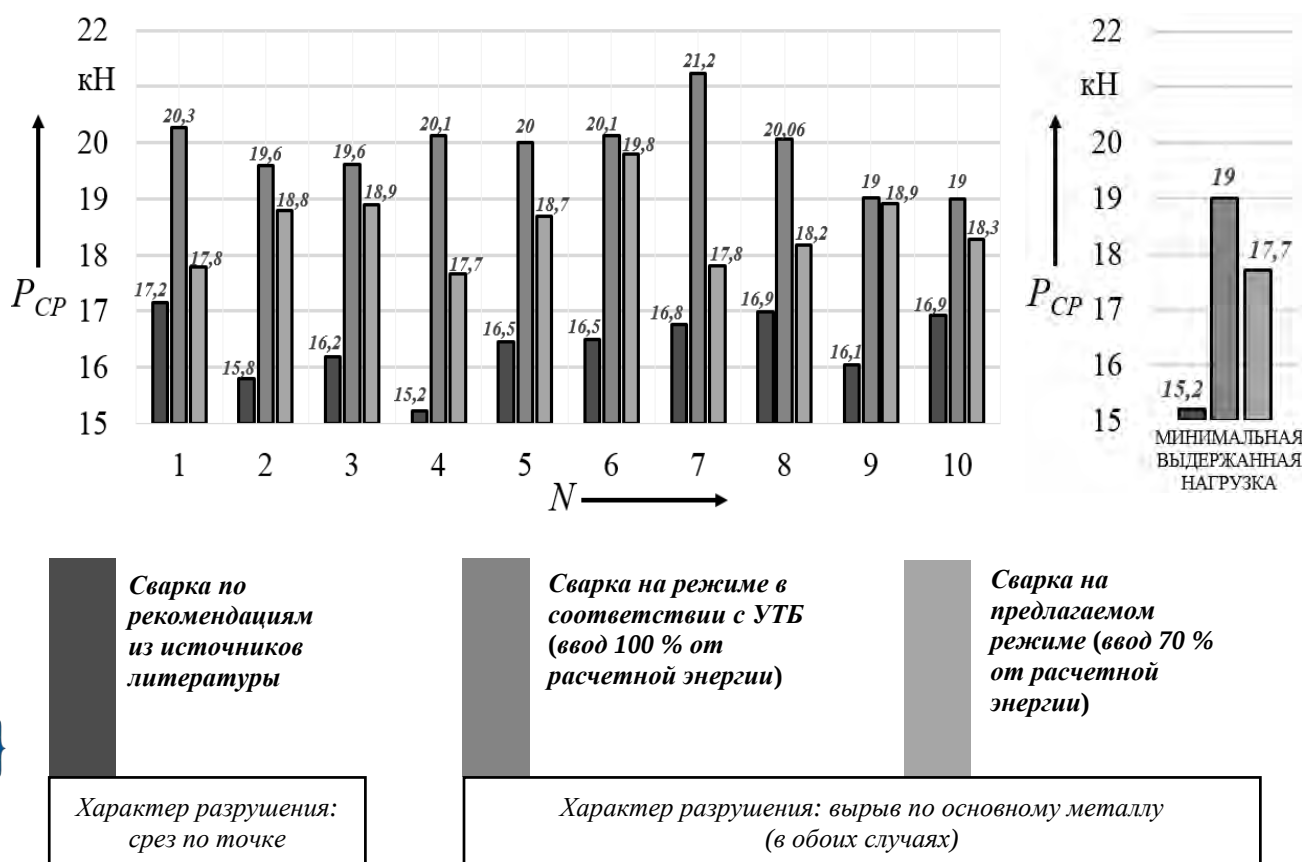


а – после КРС на базовом режиме; б – после КРС с вводом $0,26Q_{\text{ЭЭ}}$; в – после КРС с вводом $0,5Q_{\text{ЭЭ}}$

Рисунок 4.24 – Разрушенные образцы

Таким образом, было установлено, что в соответствии с предлагаемым режимом сварки ввод в межэлектродную зону 70 % (и более) от расчетной энергии обеспечивает разрушение соединений по основному металлу, однако при нагрузках, на 1...1,5 кН меньших, чем после базового режима КРС [50]. Было предположено, что это может происходить в результате повышения твердости формируемых литых зон и ЗТВ при изменении циклограммы нагрева при КРС (этот вопрос более подробно рассмотрен в подразд. 4.5).

На рисунке 4.25 представлена сравнительная статистика прочностных испытаний соединений по значению выдержанной нагрузки P_{CP} при статическом нагружении на срез для десяти образцов, полученных на каждом из рассматриваемых режимов КРС.



Сварка по рекомендациям из источников литературы

Характер разрушения: срез по точке

Сварка на режиме в соответствии с УТБ (ввод 100 % от расчетной энергии)

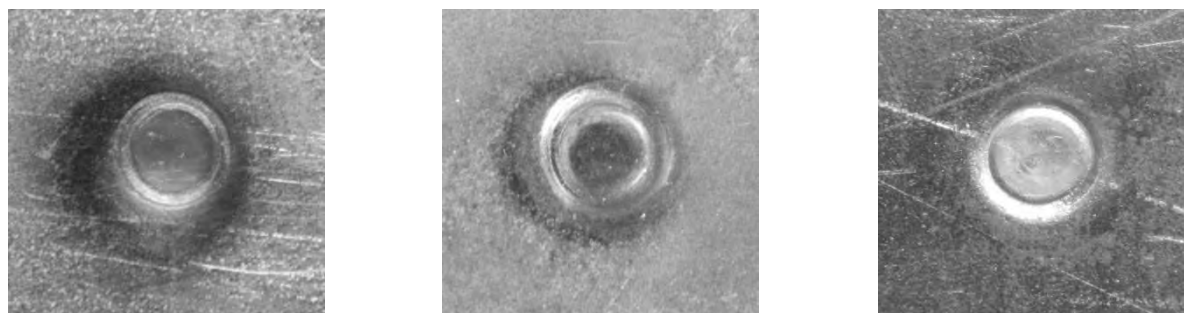
Характер разрушения: вырыв по основному металлу (в обоих случаях)

Сварка на предлагаемом режиме (ввод 70 % от расчетной энергии)

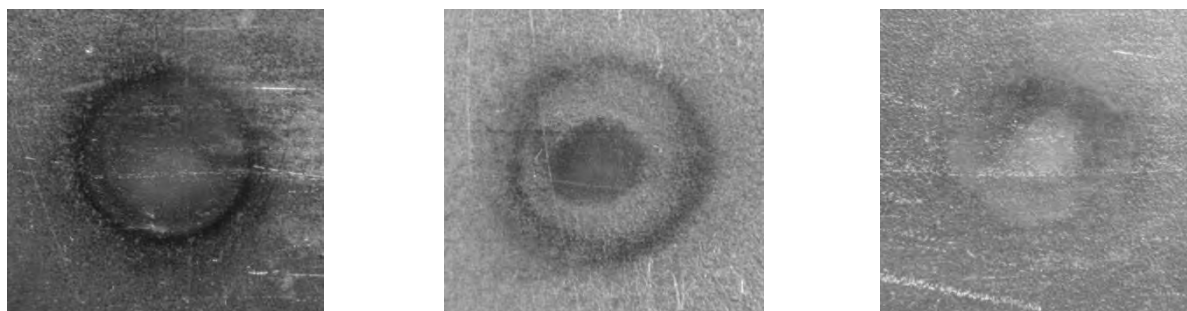
Рисунок 4.25 – Сравнительная статистика прочностных испытаний соединений (N – номер образца)

Внешний вид лицевых поверхностей соединений представлен на рисунке 4.26.

Далее при эксперименте в программном коде среды LVW 2010 (на САУ КРС «Энергия») вписывали значение $Q_{ЭЭ} = 4,55$ кДж (70 % от расчетной $Q_{ЭЭ}$), а расчетный (сварочный) ток, задаваемый на второй ступени импульса, последовательно уменьшали: задавали ток I_2 , равный 80 % от расчетного, затем 70, 60, 55 и 50 % (рисунок 4.27).



С ЛИЦЕВОЙ СТОРОНЫ ДЕТАЛИ С РЕЛЬЕФОМ



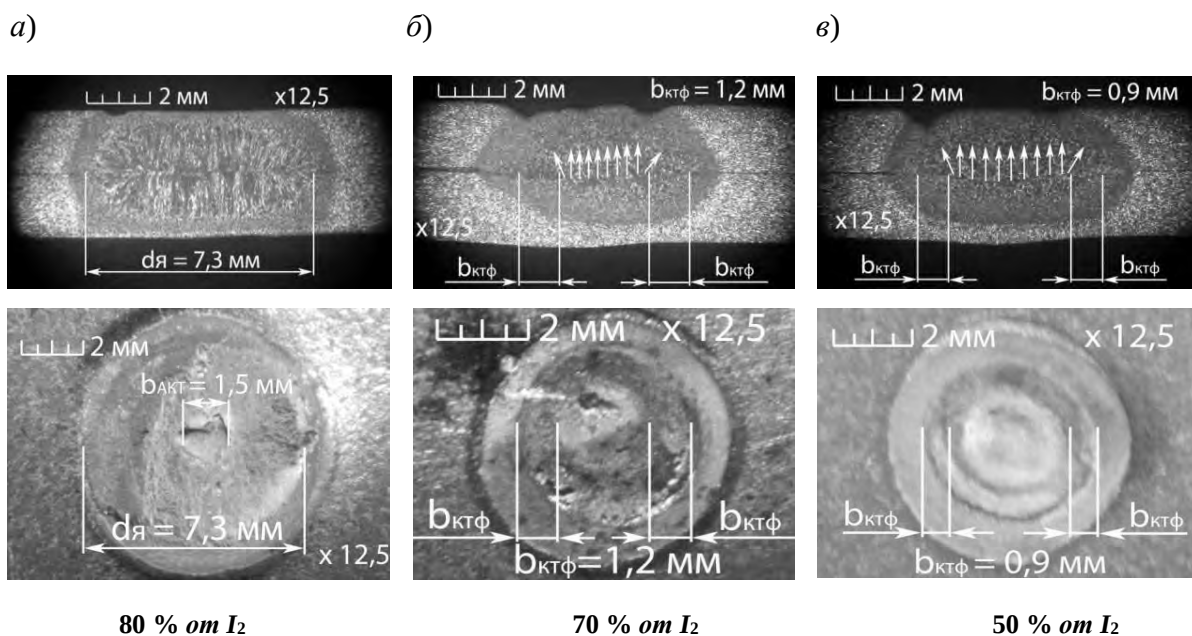
С ЛИЦЕВОЙ СТОРОНЫ ДЕТАЛИ БЕЗ РЕЛЬЕФА

↑
1 На режиме
по УТБ
(с вводом 100 %
от расчетной $Q_{ЭЭ}$)

↑
2 На режиме,
рекомендуемом
в источниках
литературы

↑
3 На предлагаемом
режиме
(с вводом 70 %
от расчетной $Q_{ЭЭ}$)

Рисунок 4.26 – Внешний вид лицевых поверхностей соединений



80 % от I_2

70 % от I_2

50 % от I_2

$d_{я}$ – диаметр литого ядра; $b_{АКТ}$ – зона активации; $b_{КТФ}$ – ширина кольца твердой фазы (стрелками показаны направления выдавливания металла при сварке)

Рисунок 4.27 – Макрошлифы и места разрушения соединений, отражающие влияние I_2 на характер их формирования

В результате было установлено, что уменьшение тока (сварочного) на второй ступени импульса относительно расчетного (максимального) значения лишь на 20 % приводит к уменьшению прочности соединений уже на 14 % (с 21,4 до 18,4 кН) независимо от приложения $F_{КОВ}$ к зоне сварки после выключения тока.

В дальнейшем тенденция к уменьшению прочности усиливается [159]. В контакте деталь–деталь появляются участки без взаимного расплавления металла (твердая фаза), общая площадь которых растет с уменьшением величины I_2 .

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на наличие тока подогрева, вводящего в межэлектродную зону минимальную часть от расчетной $Q_{ЭЭ}$, достаточную для стабилизации параметра $R_{ЭЭ}$ и избежания начального выплеска металла (см. подразд. 2.7), только расчетный (сварочный) ток обеспечивает введение в межэлектродную зону за минимально возможное время такой части от расчетной энергии, которой достаточно для взаимного расплавления и объемного взаимодействия металла свариваемых деталей. В противном случае не соблюдается требование жесткости режима сварки, в результате чего вместо литого ядра образуется твердофазное кольцо, в конечном счете обеспечивающее меньшую прочность соединений (см. рисунок 4.27, б, в). При этом зона активации занимает всю внутреннюю площадь контакта деталь–деталь внутри твердофазного кольца.

С другой стороны, следует отметить, что уменьшение тока на второй ступени импульса относительно расчетного (максимального) значения даже на 50 % не приводит к полной потере прочности соединений – наблюдается снижение лишь на 33 % (14,3 кН вместо 21,4 кН).

Таким образом, в случаях КРС малоответственных конструкций, к которым предъявляются требования невысокой прочности, твердофазные рельефные сварные соединения (без расплавления) со схватыванием по периметру могут считаться допустимыми. В таких случаях расчетный (сварочный) ток должен обеспечивать введение в межэлектродную зону за минимально возможное время такой части от расчетной $Q_{ЭЭ}$, которой достаточно:

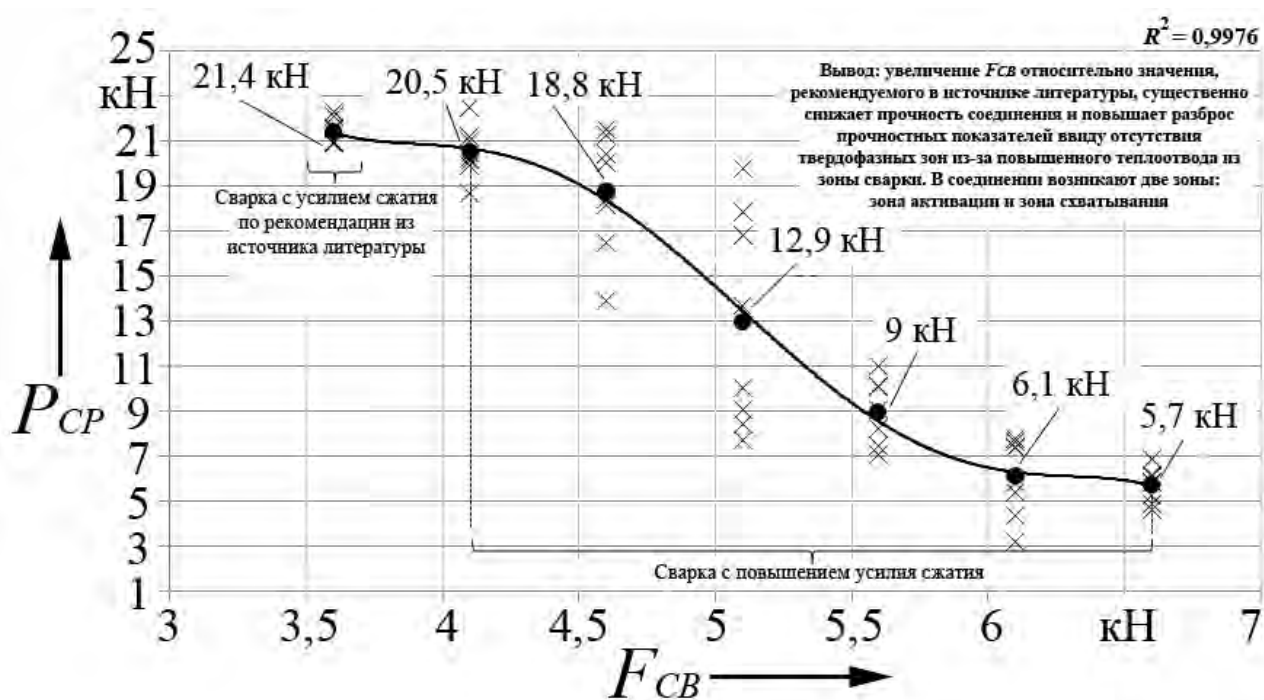
- для вдавливания центральной части рельефа в металл встречной детали;
- для деформирования рельефа в обратную сторону с целью закрытия лунки от штамповки;
- для выдавливания наружной части рельефа в радиальном направлении в зазор между деталями;
- для нагрева металла рельефа, выдавленного в зазор, с целью образования твердофазного кольца в зоне соединения.

$F_{КОВ}$ в таких случаях необходимо прикладывать к зоне сварки после выключения тока с целью дополнительного упрочнения полученного твердофазного кольца и зоны схватывания металла вокруг него.



Далее при эксперименте для предлагаемого режима с вводом в межэлектродную зону 70 % от расчетной $Q_{ЭЭ}$ (установленного выше) параметр F_{CB} последовательно увеличивали относительно базового режима (3,6 кН) до 4,1; 4,6; 5,1; 5,5; 6,1 и 6,6 кН соответственно. Параметр $F_{КОВ}$ тоже увеличивался (до 14; 15,8; 17,8; 20,8; 22,8 и 24 кН соответственно) по причине того, что на машине МТ-3201 он выставляется автоматически в зависимости от F_{CB} , установленного редуктором.

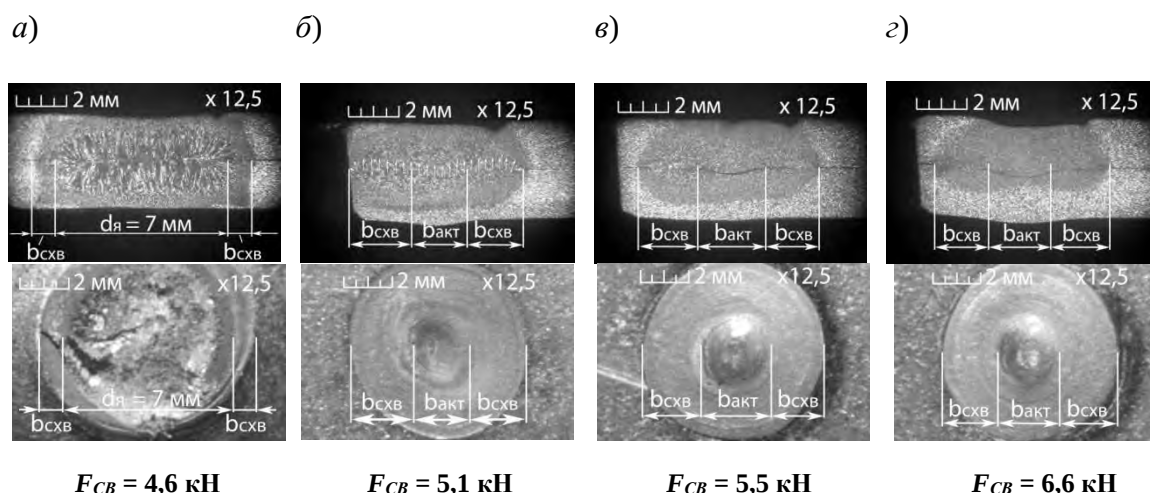
В результате было определено, что увеличение F_{CB} относительно рекомендуемого в литературе значения лишь на 0,5 кН приводит к падению прочности соединения на 4...5 % (с 21,4 до 20,5 кН). В дальнейшем тенденция усиливается: при увеличении F_{CB} на 3 кН прочность падает на 74 % (с 21,4 до 5,7 кН) (рисунок 4.28).



P_{CP} – нагрузка, выдержанная образцом при испытании статическим нагружением на срез; R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

Рисунок 4.28 – Влияние F_{CB} на прочность соединений

Это связано с тем, что при КРС с увеличением F_{CB} существенно увеличивается площадь контакта деталь–деталь, а это приводит к значительному уменьшению параметра $R_{ЭЭ}$. Следствие этого – повышенный теплоотвод из зоны сварки. Вместо твердофазного соединения образуется соединение, имеющее две зоны: зону активации поверхностей свариваемых деталей (прилежащую к вершине рельефа) и зону схватывания металла свариваемых деталей (зона физического контакта) (рисунок 4.29).



$d_я$ – диаметр литого ядра; $b_{акт}$ – зона активации; $b_{схв}$ – зона схватывания металла (стрелками показаны направления выдавливания металла при сварке)

Рисунок 4.29 – Влияние увеличения F_{CB} на характер формирования соединений

В зоне активации из-за повышенного теплоотвода, концентрации линий протекания тока от центра к периферии рельефа и выдавливания металла рельефа в осевом и радиальном направлениях нагрев в вершине рельефа существенно уменьшается, что не позволяет в достаточной мере ликвидировать из контакта оксидные пленки и окислы. Об этом свидетельствует металлический блеск данной зоны на картинах разрушения образцов, а также четко видимая линия стыка на макрошлифах (см. рисунок 4.29, б–з). При сопоставлении макрошлифов четко просматривается уменьшение степени прогрева нижней детали с увеличением F_{CB} ввиду повышенного теплоотвода из зоны контакта деталь–деталь.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1 При КРС использование двухступенчатого введения энергии в межэлектродную зону определенными токами – током подогрева, составляющим 50 % от расчетного, и расчетным (максимальным) током – в совокупности с приложением к зоне сварки повышенного ковочного усилия после выключения тока позволяет до 30 % снизить энергопотребление сварочной контактной машины в каждом цикле сварки без существенного ущерба прочности соединений. Методика определения энергопотребления сварочной машины (на основе коэффициента мощности, КПД, коэффициента использования полной мощности и др. параметров) для различных циклограмм нагрева при КРС приведена в [160].

2 В случаях КРС малоответственных конструкций, воспринимающих незначительные эксплуатационные нагрузки, допускается уменьшать расчетный (сварочный) ток в двухступенчатом импульсе на 20...50 %, что снижает

прочность соединений лишь на 14...33 % при испытаниях статическим нагружением на срез. Это объясняется образованием в соединении твердофазного кольца вместо литого ядра.

3 При КРС с двухступенчатым дозированным введением энергии в межэлектродную зону чрезмерное увеличение усилия сжатия электродов (на 15...20 % и более) относительно значений, рекомендуемых в источниках литературы, нежелательно, т. к. это может приводить к отсутствию в зоне сварки как литого ядра, так и твердофазного соединения с соответствующим наличием двух других зон – зоны активации и зоны схватывания металла свариваемых деталей – в связи с повышенным теплоотводом из зоны контакта деталь–деталь.

4.5 Анализ влияния циклограммы нагрева межэлектродной зоны на твердость металла соединений при КРС

При эксплуатации сварные соединения, получаемые способом КРС, могут подвергаться не только воздействию статического нагружения на срез (или отрыв), но и динамического. Типичным примером являются кузова легковых и грузовых автомобилей, отдельные элементы которых при разгоне, торможении и столкновении с препятствиями воспринимают не только постоянные, но и знакопеременные нагрузки [45].

В подобных случаях качество сварных соединений необходимо оценивать как по показателю прочности, так и по пластичности, твердости, а также ударной вязкости.

При этом значительно меньший размер ЗТВ у рельефных соединений по сравнению с точечными и дуговыми позволяет утверждать, что КРС на режимах, рекомендуемых в [1, 4, 6] и характеризуемых диаметрами литых зон в соответствии с ГОСТ 15878–79, обеспечивает получение не только прочных, но и пластичных соединений (с достаточно высокой ударной вязкостью).

Эксперименты по КРС соединений, состоящих из двух деталей из низкоуглеродистой стали, приведенные в подразд. 4.4, показали, что изменение циклограммы нагрева металла межэлектродной зоны может не изменять характер разрушения сварных соединений при их последующих прочностных испытаниях статическим нагружением на срез (например, если разрушение соединений происходит по основному металлу в обоих случаях).

При этом было замечено, что после КРС на предлагаемых режимах (с многоступенчатым импульсом тока и плавным нагревом межэлектродной зоны) разрушение соединений может происходить при меньших нагрузках (на 1...1,5 кН), чем после КРС на режимах с крутонарастающим импульсом тока и скачкообразным нагревом межэлектродной зоны, рекомендуемых в литературе (см. рисунок 4.24).

Было предположено, что причиной этого может являться повышение твердости литых зон и ЗТВ (с соответствующим снижением пластичности) от использования режимов КРС, обеспечиваемых САУ КРС «Энергия» и повышающих скорость охлаждения металла межэлектродной зоны при уменьшении ввода в нее параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$.

Рассматривалась КРС соединений, состоящих из двух пластин (материал – сталь Ст 3) размером 100×30 мм толщиной $2 + 2$ мм по одному круглому выштампованному рельефу габаритами $6 \times 1,2$ мм (аналогичных соединениям из подразд. 2.7 и 4.4).

Базовый режим рассматривался в двух вариантах:

1) $\tau_{\text{СВ}} = 0,28$ с; $I_{\text{СВ}} = 16$ кА; $F_{\text{СВ}} = 3,6$ кН; $R_{\text{ЭЭ}} = 80$ мкОм; $Q_{\text{ЭЭ}} = 6,5$ кДж; материал электродов – медь М1 (по циклограмме без приложения $F_{\text{КОВ}}$ в момент выключения тока);

2) то же, что и в п. 1, но с приложением $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН длительностью $\tau_{\text{КОВ}} = 1,2$ с.

Сравнение базовых режимов велось с предлагаемым, установленным в подразд. 4.4 и обеспечиваемым САУ КРС «Энергия». В этом случае в циклограмме также использовался параметр $F_{\text{КОВ}}$ (рисунок 4.30). Фактическая длительность протекания токов подогрева и сварки в двухступенчатом импульсе составила $\tau_1 = 0,06$ и $\tau_2 = 0,17$ с соответственно (значения определены при КРС в реальном времени посредством САУ КРС «Энергия»).

а)

Параметр режима	Значение
$I_{\text{СВ1}}$, кА	7,5
$I_{\text{СВ2}}$, кА	16
$F_{\text{СВ}}$, кН	3,6
$F_{\text{КОВ}}$, кН	12
$\tau_{\text{СЖ}}$, с	0,8
$\tau_{\text{ЗАП}}$, с	0,01
$\tau_{\text{КОВ}}$, с	1,2
Q_1 , кДж	0,43 (6,6 %)
Q_2 , кДж	4,12 (63,4 %)

б)

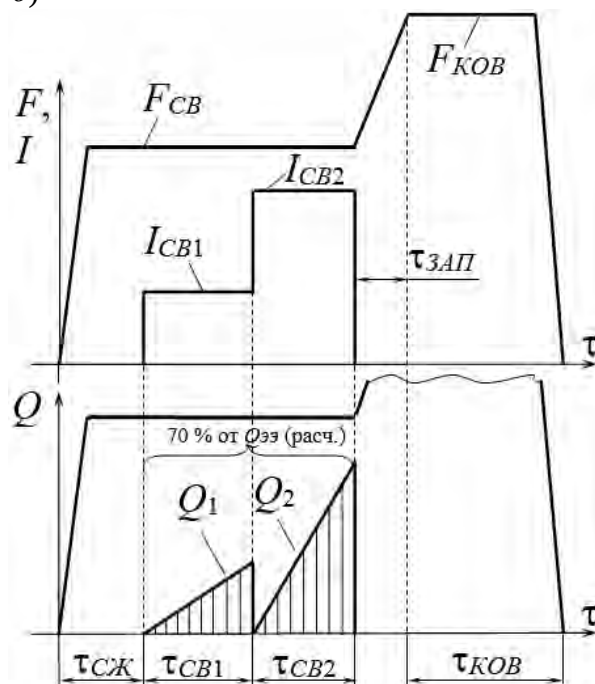


Рисунок 4.30 – Предлагаемый режим КРС (а) и циклограмма процесса (б)



На каждом из трех режимов сваривалось по десять образцов.

Затем изготавливались макрошлифы соединений путем резки, абразивной шлифовки и травления образцов 30-процентным раствором хлористого железа в воде.

Твердость по Виккерсу измерялась с помощью твердомера фирмы AFFRI итальянского производства (рисунок 4.31, *а*).

Схема уколов представлена на рисунке 4.31, *б*.

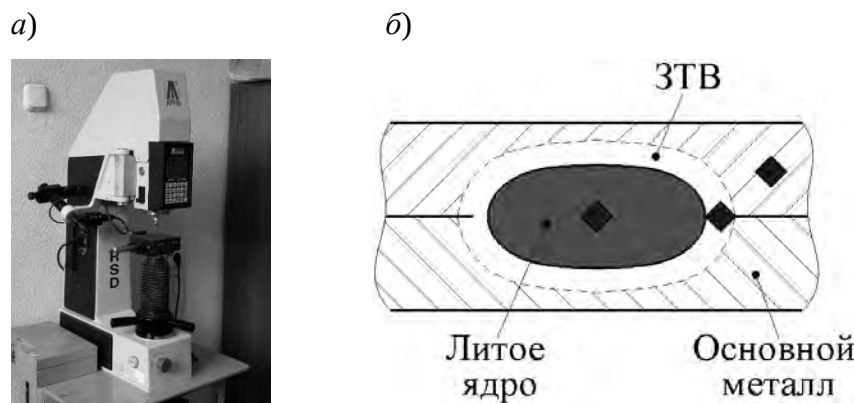


Рисунок 4.31 – Твердомер фирмы AFFRI (*а*) и схема уколов образцов при определении твердости HV (*б*)

Средняя твердость в центре литого ядра при КРС на двух базовых и предлагаемом режимах составила 159, 204 и 259 HV соответственно (рисунок 4.32).

Средняя твердость в ЗТВ по границе сплавления при КРС на двух базовых и предлагаемом режимах составила 204, 225 и 250 HV соответственно (рисунок 4.33).

Разброс показаний твердомера на десяти образцах в каждом из трех случаев КРС не превысил 5 %. Средняя твердость основного металла при КРС на двух базовых и предлагаемом режимах существенно не изменилась и составила от 140 до 144 HV.

Совмещение аппроксимированных кривых изменения твердости в различных зонах сварного соединения при КРС на двух базовых и предлагаемом режимах представлено на рисунке 4.34 [161].

Таким образом, эксперимент показал, что при КРС пластин из ферритно-перлитной низкоуглеродистой тонколистовой стали по круглым выштампованным рельефам использование циклограммы нагрева с дозированным двухэтапным вводом в межэлектродную зону 70 % от расчетного параметра $Q_{\text{ЭЭ}}$ (по УТБ) путем задания двухступенчатого импульса тока (подогрева и сварки) в совокупности с приложением $F_{\text{КОВ}}$ к электродам в момент выключения тока дает следующий эффект.

1 Повышается твердость металла литого ядра и ЗТВ на 39 и 19 % соответственно в сравнении с КРС на базовом режиме (без приложения $F_{КОВ}$), определяемом по УТБ с учетом рекомендаций из источников литературы.

2 Повышается твердость литого ядра и ЗТВ на 22 и 10 % соответственно в сравнении с КРС на базовом режиме (с приложением $F_{КОВ}$), определяемом по УТБ с учетом рекомендаций из источников литературы.

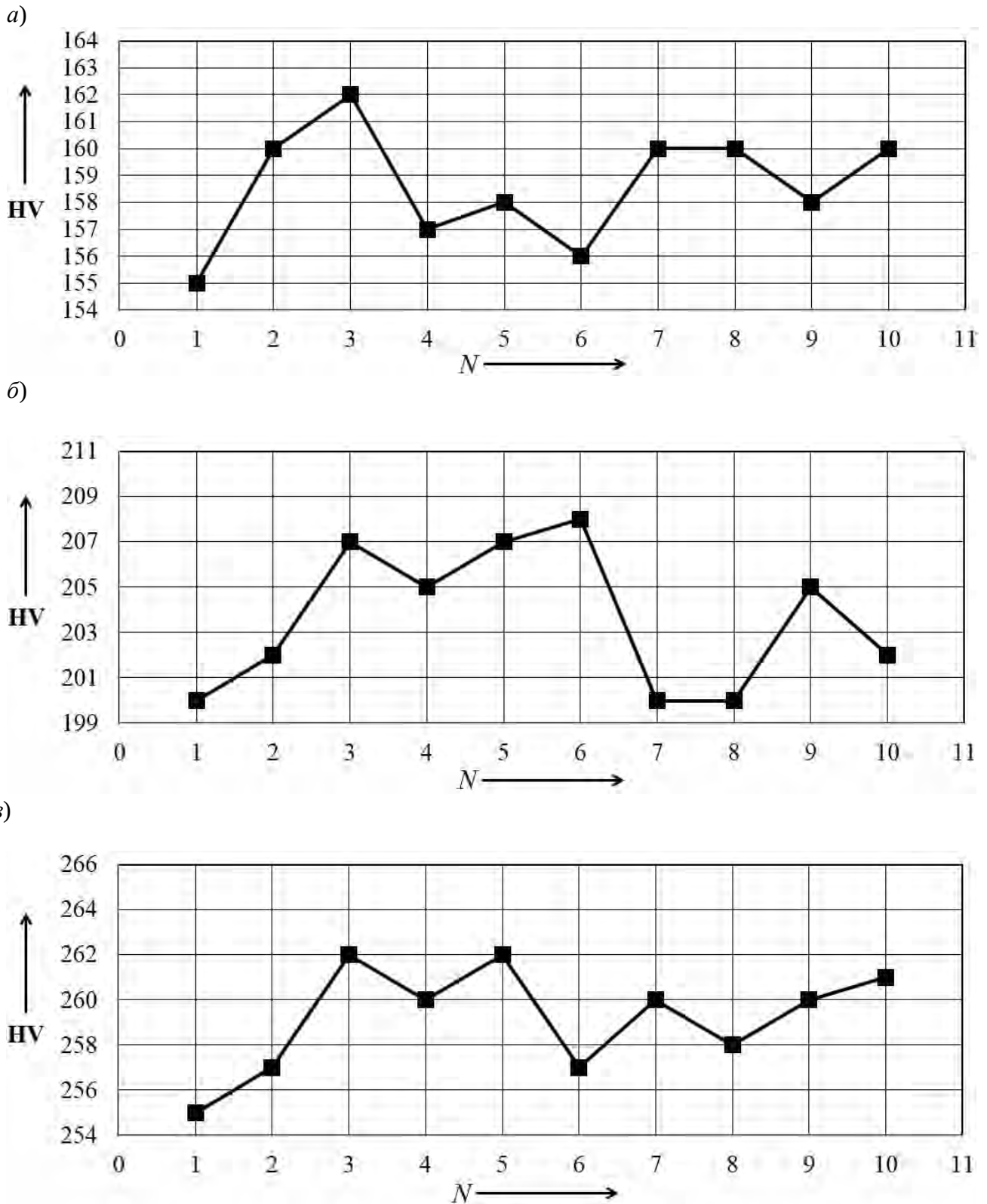
3 Более равномерно распределяется твердость между литым ядром и ЗТВ в сравнении со сваркой на базовых режимах.

При использовании предлагаемого режима КРС увеличение твердости литого ядра и ЗТВ находится в рамках допустимых значений (не более 320 HV для низкоуглеродистых сталей [163, 164]), что объясняется изменением характера деформирования рельефа в процессе нагрева, влияющим на скорость охлаждения металла.

Ток подогрева на первой ступени импульса в начале процесса КРС не позволяет рельефу интенсивно сминаться. Роль тока подогрева состоит в начальной стабилизации параметра $R_{ЭЭ}$, причем благодаря пониженной площади контакта деталь–деталь плотность тока в нем значительно повышается. Относительно малая величина тока при подогреве не позволяет рельефу преждевременно деформироваться, и электрическая энергия преобразуется в тепловую, с одной стороны, при меньшем теплоотводе в электроды и относительно большей плотности тока в зоне контакта деталь–деталь за счет его малой площади на первой стадии прохождения тока и, с другой стороны, при одновременном отсутствии перегрева в контакте.

Расчетный (сварочный) ток на второй ступени импульса в дальнейшем интенсивно сминает рельеф, значительно увеличивая площадь контакта деталь–деталь и уменьшая плотность тока в нем. Но так как фактическая продолжительность протекания расчетного тока примерно в 1,5 раза ниже, чем на базовых режимах, то выделяемая тепловая мощность при нагреве металла уменьшается. По этой причине охлаждение межэлектродной зоны происходит более интенсивно (с меньших температур).

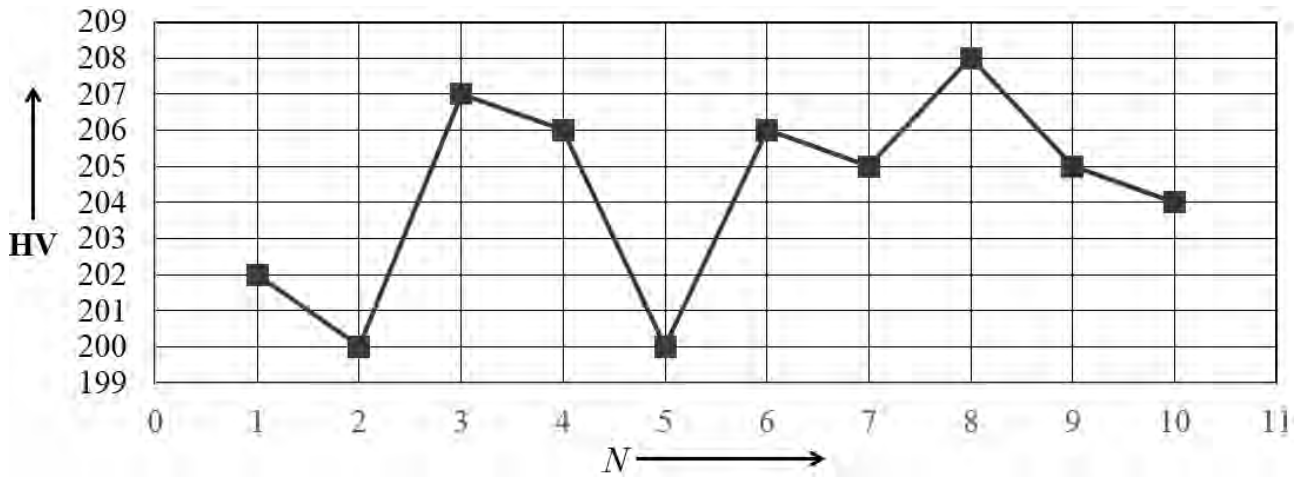
При этом следует отметить, что во всех случаях КРС на участке литого ядра между его центром и ЗТВ вдоль границы сплавления наблюдается зона повышенной твердости (вплоть до 300 HV; на рисунке 4.34 не указана), что свидетельствует о наличии области преимущественно мартенситной структуры, которая может негативно влиять на прочностные характеристики соединений при ударных и знакопеременных нагрузках. Причина ее образования – высокая скорость охлаждения при КРС, достигающая 400...500 °C в секунду [56, 165], особенно при явлении «вредной проковки» от чрезмерных усилий сжатия [3].



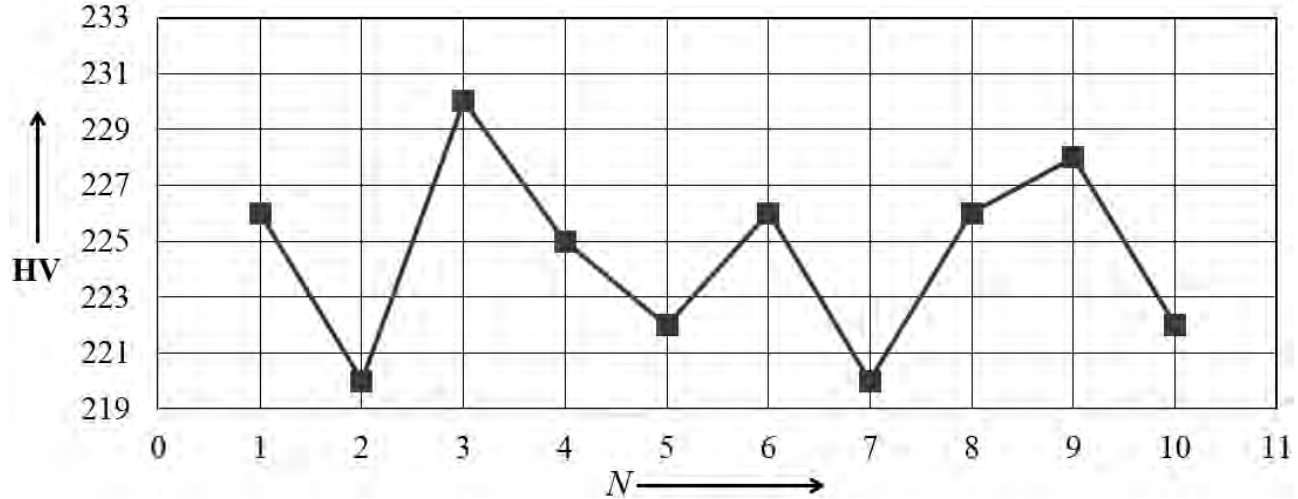
а – при КРС на базовом режиме без приложения $F_{КОВ}$ (с проковкой сварочным усилием);
 б – при КРС на базовом режиме с приложением $F_{КОВ}$; в – при КРС на предлагаемом режиме с приложением $F_{КОВ}$; N – номер образца

Рисунок 4.32 – Разброс значений твердости в центре литого ядра

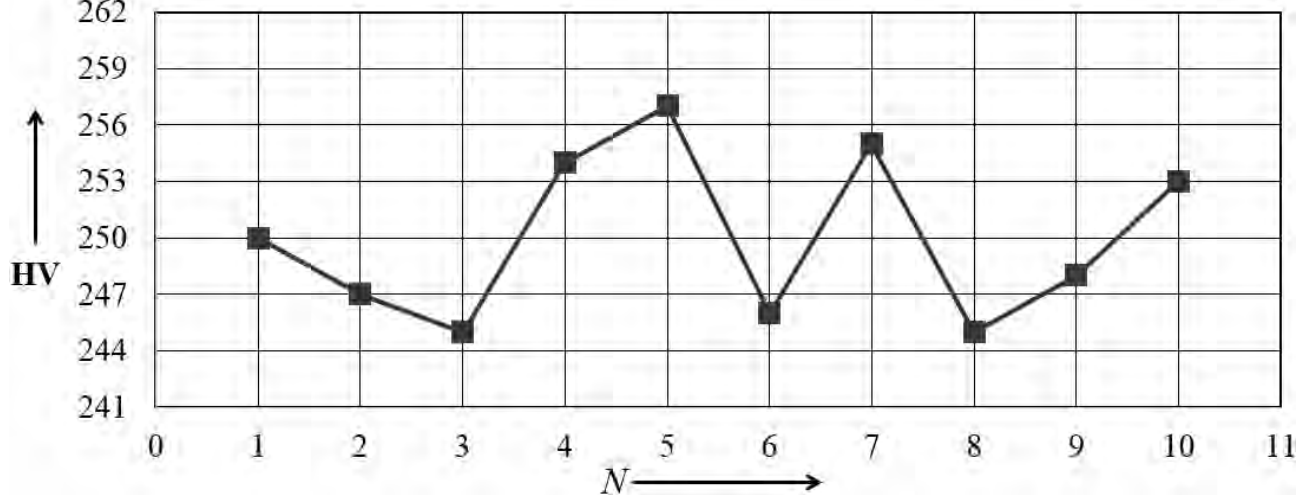
а)



б)

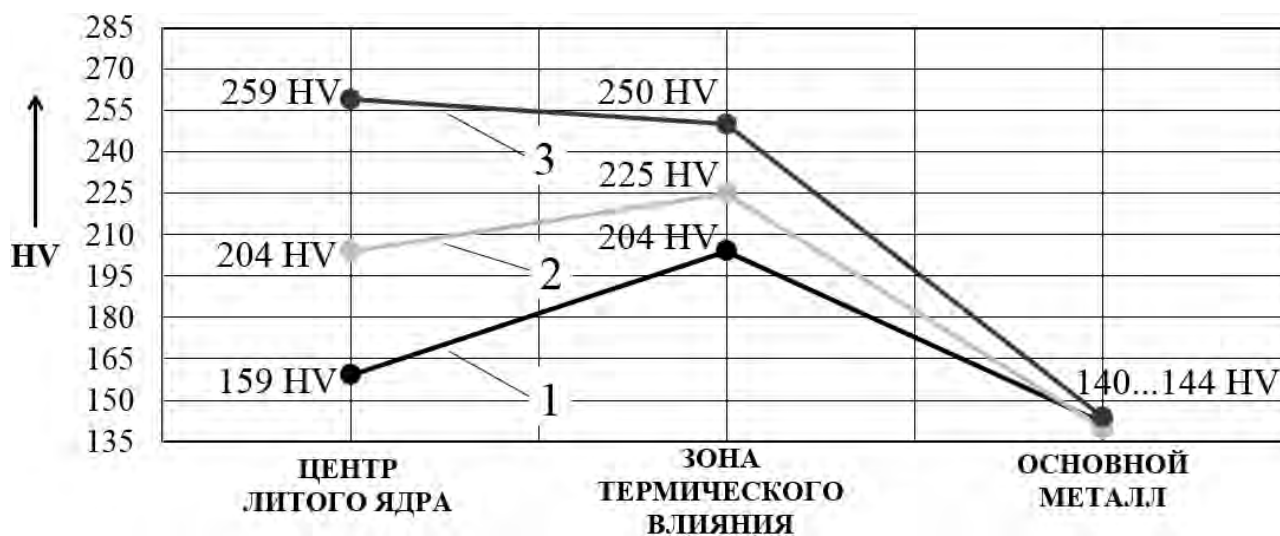


в)



а – при КРС на базовом режиме без приложения $F_{КОВ}$ (с проковкой сварочным усилием);
 б – при КРС на базовом режиме с приложением $F_{КОВ}$; в – при КРС на предлагаемом режиме с приложением $F_{КОВ}$; N – номер образца

Рисунок 4.33 – Разброс значений твердости в ЗТВ по границе сплавления



1 – при КРС на базовом режиме без приложения $F_{КОВ}$ (с проковкой сварочным усилием);
 2 – при КРС на базовом режиме с приложением $F_{КОВ}$; 3 – при КРС на предлагаемом режиме с приложением $F_{КОВ}$

Рисунок 4.34 – Кривые изменения твердости в отдельных зонах сварного соединения (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 1$ [162])

Таким образом, по четвертому разделу монографии можно сделать следующие выводы.

1 Установлено, что при КРС для стабилизации процесса уменьшения сопротивления межэлектродной зоны во времени на ранее установленных трех основных этапах кинетики формирования соединений (2–4) энергию, рассчитываемую по уравнению теплового баланса, в эту зону необходимо вводить следующими токами:

- на этапах 2 и 4 токами, не превышающими 50 % от расчетного по уравнению теплового баланса (током $I_{ПОД}$ для предварительного подогрева металла деталей с целью активации контактных поверхностей либо током $I_{ТО}$ для последующей термообработки ЗТВ с целью замедления скорости ее охлаждения);

- на этапе 3 расчетным (сварочным) током $I_{СВ}$ (для интенсивного разогрева и объемного взаимодействия металла свариваемых деталей).

2 Установлено, что при КРС на этапе 2 кинетики формирования соединений для стабилизации начальной площади контакта деталь–деталь в межэлектродную зону током $I_{ПОД}$ достаточно вводить не более 5 % от значения энергии, рассчитываемой по уравнению теплового баланса.

3 Установлено, что при КРС нахлесточных соединений по круглым выштампованным рельефам можно обеспечить 35-процентное уменьшение энергопотребления сварочной машины при одновременном сохранении требуемой прочности соединений с расплавлением металла свариваемых деталей за счет следующего механизма:

- при сварке в межэлектродную зону в три этапа дозированно ввести 65 % от расчетной энергии (по уравнению теплового баланса);

- для реализации процесса перед сваркой величину расчетной энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону по уравнению теплового баланса, указать в программном коде САУ КРС «Энергия» поэтапно в соотношении 5 % + 90 % + 5 % для соответствующих токов трехступенчатого импульса $I_{\text{Под}} + I_{\text{СВ}} + I_{\text{ТО}}$;

- затем в этом же программном коде каждое из требуемых значений энергии, необходимой для поэтапного ввода в межэлектродную зону, уменьшить на 35 %;

- осуществить процесс сварки.

4 Установлено, что КРС нахлесточных соединений по круглым выштампованным рельефам может обеспечить 30-процентное уменьшение энергопотребления сварочной машины при одновременном сохранении требуемой прочности соединений с расплавлением металла свариваемых деталей за счет следующего механизма:

- при сварке в межэлектродную зону в два этапа дозированно ввести 70 % от расчетной энергии (по уравнению теплового баланса);

- для реализации процесса перед сваркой величину расчетной энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону по уравнению теплового баланса, указать в программном коде САУ КРС «Энергия» поэтапно в соотношении 5 % + 65 % для соответствующих токов двухступенчатого импульса $I_{\text{Под}} + I_{\text{СВ}}$ (установленные основные этапы 3 и 4 кинетики формирования соединения объединены);

- осуществить процесс сварки, причем в момент выключения тока к деталям приложить повышенное ковочное усилие длительностью 0,4...1,2 с и величиной, соответствующей заданному усилию сжатия (по кривым их взаимосвязи из техпаспорта конкретной сварочной машины).

Данный механизм позволяет исключить выплески расплавленного металла из межэлектродной зоны в первые несколько периодов сетевого напряжения, что предотвращает сокращение объема взаимодействующего металла деталей, уменьшает его усадку при кристаллизации и в конечном счете способствует уменьшению деформации и вмятины на лицевой поверхности детали с рельефом, а также преобразованию вмятины в выпуклость на лицевой поверхности детали без рельефа.

5 Установлено, что при КРС нахлесточных соединений типа «пластина + болт» по кольцевым высаженным рельефам можно обеспечить 15-процентное уменьшение энергопотребления сварочной машины при одновременном сохранении требуемой прочности соединений с расплавлением металла свариваемых деталей за счет следующего механизма:



– при сварке в межэлектродную зону в два этапа дозированно ввести 85 % от расчетной энергии (по уравнению теплового баланса);

– для реализации процесса перед сваркой величину расчетной энергии, необходимой для ввода в межэлектродную зону по уравнению теплового баланса, указать в программном коде САУ КРС «Энергия» поэтапно в соотношении 5 % + 80 % для соответствующих токов двухступенчатого импульса $I_{под} + I_{св}$ (установленные основные этапы 3 и 4 кинетики формирования соединения объединены);

– осуществить процесс сварки.

6 Установлено, что при КРС малоответственных нахлесточных соединений, воспринимающих незначительные эксплуатационные нагрузки, допускается уменьшать расчетный (сварочный) ток в двухступенчатом импульсе на 20...50 % без изменения усилия сжатия электродов при условии введения в межэлектродную зону не менее 70 % от расчетной энергии, что в совокупности снижает прочность формируемых соединений лишь на 14...33 % при испытаниях статическим нагружением на срез по причине образования твердофазного кольца (без расплавления металла) вместо литого ядра.

7 Установлено, что при КРС нахлесточных соединений с двухэтапным дозированным введением в межэлектродную зону не менее 70 % от расчетной энергии расчетным (сварочным) током превышение усилия сжатия электродов более чем на 5...10 % относительно значений, рекомендуемых в литературе, недопустимо, т. к. это приводит к отсутствию в зоне сварки как литого ядра, так и твердофазного соединения с соответствующим наличием двух других зон – зоны активации и зоны схватывания металла свариваемых деталей – в связи с повышенным теплоотводом из зоны контакта деталь–деталь.

8 Установлено, что при КРС нахлесточных соединений из низкоуглеродистой стали использование циклограммы нагрева с дозированным двухэтапным вводом в межэлектродную зону 70 % от расчетной энергии (по УТБ) путем задания двухступенчатого импульса тока (подогрева и сварки) в совокупности с приложением к электродам повышенного ковочного усилия в момент выключения тока увеличивает твердость литого ядра и зоны термического влияния (находится в рамках допустимых значений), что объясняется изменением характера деформирования рельефа в процессе нагрева, влияющим на скорость охлаждения металла.

5 Методика определения энергопотребления сварочной машины при КРС

Эффективное внедрение на промышленных предприятиях энергосберегающих режимов КРС взамен традиционно используемых возможно только при наличии расчетных методик, позволяющих быстро и достоверно оценить перспективу применения таких новшеств.

Данные методики должны позволять осуществлять три типа расчетов применительно к процессу КРС:

- 1) расчет потребления сварочной машиной сетевой электроэнергии;
- 2) расчет потребления активной (полезной) мощности, затрачиваемой непосредственно на формирование сварного соединения;
- 3) расчет потерь активной мощности в сварочном контуре и трансформаторе, снижающих энергоэффективность процесса сварки в целом.

При этом формулы расчета активной, реактивной и полной мощности, потребляемой сварочной машиной из сети при регулировании тока за счет переключения ступеней трансформатора и изменения угла включения тиристорного контактора, имеются в литературе по сварке давлением [74, 166].

Однако при попытках реализации подобных расчетов на практике возникает целый ряд проблем.

1 Расчет активного сопротивления вторичной цепи сварочной машины по известной методике [167] затруднителен, т. к. обычно не известны точные значения сопротивлений контактов между элементами вторичного контура (электроды, электрододержатели, хоботы, шины, консоли), а расчет активных сопротивлений каждого из этих элементов (с учетом их геометрических параметров и теплофизических свойств) весьма приблизителен. Также существенные погрешности дают расчет коэффициентов поверхностного эффекта и пересчет суммарного активного сопротивления вторичного контура с учетом его предполагаемого нагрева до температуры 70...80 °С.

2 Сложный характер кривой изменения параметра R_{Σ} при КРС. В формулы обычно подставляются значения стабилизированного R_{Σ} (в момент выключения тока), хотя при сварке R_{Σ} постоянно уменьшается.

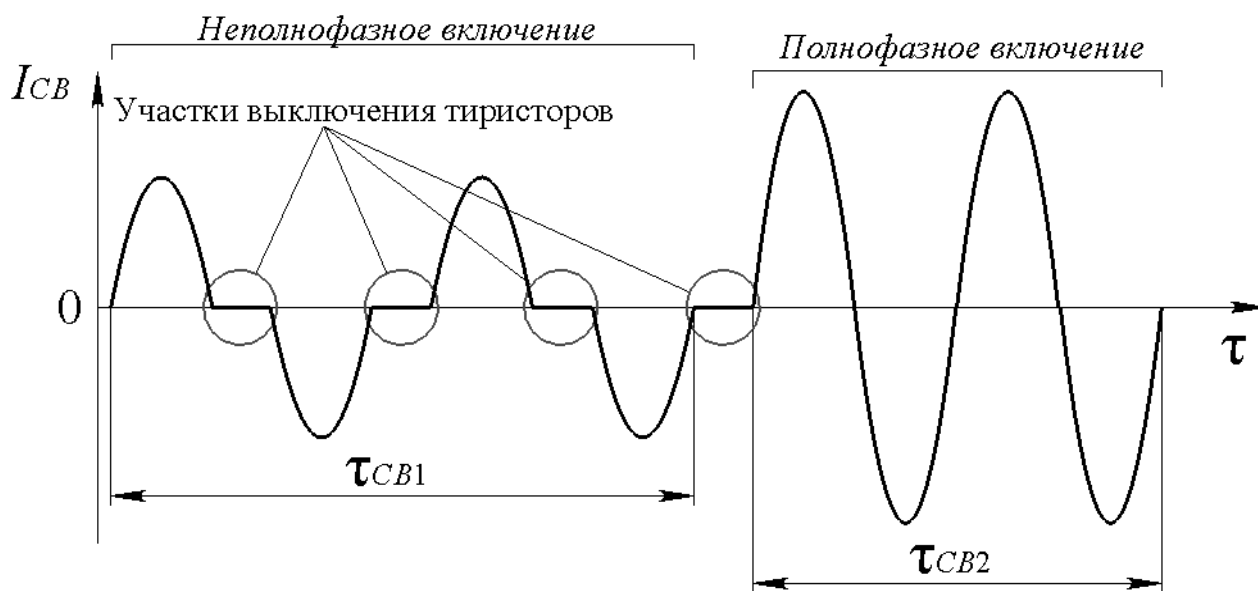
3 Низкая точность расчета полного индуктивного сопротивления вторичного контура сварочной машины. Расчетные формулы для определения данного параметра, основанные на оценке суммарной выпрямленной длины элементов контура либо площади пространства, охватываемого контуром при сварке, очень приблизительны.

4 Напряжение холостого хода во вторичной цепи машины, значение которого необходимо подставлять в расчетные формулы, колеблется в диапазоне $\pm 10\%$ из-за соответствующих колебаний сетевого напряжения.



5 В процессе КРС сетевое напряжение может уменьшаться примерно на 20...25 В в сравнении с режимом холостого хода из-за потерь (напряжения) в сетевых кабелях и на тиристорном контакторе. К примеру, для сварочной машины МТ-3201 на шестой ступени регулирования напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора, в режиме холостого хода составляет 407 В, а при КРС двух деталей толщиной 2 + 2 мм током 15 кА – 388 В.

6 При КРС с поэтапным введением параметра $Q_{ЭЭ}$ в межэлектродную зону путем задания ступенчатого импульса тока на участках синусоиды с неполнофазным включением всегда присутствуют интервалы выключенного состояния тиристоров, которые не должны учитываться при расчетах действующего значения тока и, соответственно, сетевого энергопотребления сварочной машины (рисунок 5.1).



τ_{CB1} и τ_{CB2} – номинальные длительности протекания тока на первой и второй ступенях импульса соответственно

Рисунок 5.1 – Синусоидальный сигнал двухступенчатого импульса тока

7 Ступенчатая форма импульса тока характеризуется разными значениями параметра $R_{ЭЭ}$ при его относительной стабилизации, поэтому коэффициент мощности сварочной машины также изменяется.

С учетом вышеприведенной информации была предложена методика расчета энергетических параметров процесса КРС, включающая следующие этапы:

- 1) регистрация необходимых сигналов процесса сварки с помощью высокоточных аналого-цифровых устройств сбора данных;
- 2) компьютерная обработка и совмещение зарегистрированных сигналов;
- 3) выделение параметров, необходимых для дальнейшего расчета энергопотребления сварочной машины.

Рассматривался процесс КРС нахлесточных соединений пластин, аналогичных приведенным в подразд. 2.7, 4.4 и 4.5. На сварочном трансформаторе машины МТ-3201 (далее – сварочной машины) выставлялась ступень 6 из восьми возможных [160].

С помощью цифрового микроомметра MMR-610 (предназначенного для измерения активных сопротивлений электрических цепей) были измерены активные сопротивления вторичного и первичного контуров сварочной машины ($R_2 = 158 \text{ мкОм}$ и $R_1 = 30 \text{ мОм}$ соответственно) (рисунок 5.2). Активное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании R_{2K} определялось с учетом приведенного активного сопротивления первичной обмотки сварочного трансформатора R_1' .



Рисунок 5.2 – Измерение активного сопротивления вторичного контура машины МТ-3201 цифровым микроомметром MMR-610

Затем с помощью цифрового мультиметра УТВ-150D в первичной цепи было измерено напряжение холостого хода ($U_{LXX} = 407 \text{ В}$).

После этого к сварочной машине подключили САУ КРС «Энергия» и регистратор сварочных процессов РКДП 0401 (далее – регистратор) (см. рисунок 2.39).

За базовый был принят следующий режим КРС: $I_{CB} = 16 \text{ кА}$; $\tau_{CB} = 0,28 \text{ с}$; $F_{CB} = 3,6 \text{ кН}$; $F_{КОВ} = 12 \text{ кН}$; $\tau_{КОВ} = 1,2 \text{ с}$.

С помощью экспериментальной установки были зарегистрированы параметры сварочной машины в режимах холостого хода, короткого замыкания и сварки (таблица 5.1).

Далее были рассчитаны полное сопротивление вторичного контура сварочной машины, коэффициент мощности, а также пересчитан действующий сварочный ток (таблица 5.2).

Таблица 5.1 – Зарегистрированные параметры машины МТ-3201 (ступень 6 трансформатора)

Параметр	Значение	Устройство регистрации
Действующее напряжение во вторичной цепи (х. х.) U_{20} , В	6,88	Регистратор
Действующее напряжение во вторичной цепи (к. з.) $U_{2К.з.}$, В	5,8	
Действующее напряжение в первичной цепи (к. з.) $U_{1К.з.}$, В	388	
Максимальный ток во вторичной цепи (к. з.) $I_{2К.з.маx}$, кА	25	
Действующий ток во вторичной цепи (к. з.) $I_{2К.з.}$, кА	17,1	
Действующий ток во вторичной цепи (сварка) I_2 , кА	16	Регистратор, САУ КРС «Энергия»
Сопротивление межэлектродной зоны $R_{ээ}$, мкОм	80	САУ КРС «Энергия»

Таблица 5.2 – Расчетные параметры машины МТ-3201

Параметр	Значение	Формула
Коэффициент трансформации K в режиме холостого хода на ступени 6 трансформатора	59	U_{1XX}/U_{20}
Полное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании $Z_{2К}$, мкОм	402	$U_{20}/I_{2К.з.}$
Сопротивление первичной обмотки трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке, R_1' , мкОм	10	R_1/K^2
Активное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании $R_{2К}$, мкОм	168	$R_2 + R_1'$
Индуктивное сопротивление вторичного контура при коротком замыкании $X_{2К}$, мкОм	365	$\sqrt{Z_{2К}^2 - R_{2К}^2}$
Полное сопротивление вторичного контура при сварке Z_2 , мкОм	441	$\sqrt{(R_{2К} + R_{ээ})^2 + X_{2К}^2}$
Действующий сварочный ток I_2 , кА	15,6	U_{20}/Z_2
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,56	$(R_{2К} + R_{ээ})/Z_2$

Таким образом, на основании известных формул с использованием высокоточных аналого-цифровых устройств сбора данных были определены значения необходимых параметров, которых достаточно для дальнейшего расчета электроэнергии, потребляемой машиной МТ-3201 из сети при КРС рассматриваемых соединений на базовом режиме.

За предлагаемый был принят следующий режим КРС, приведенный в подразд. 2.7 и 4.5 (энергосберегающий): $I_{CB1} = 7,5$ кА; $\tau_1 = 0,06$ с; $Q_1 = 0,43$ кДж; $I_{CB2} = 16$ кА; $\tau_2 = 0,17$ с; $Q_2 = 4,12$ кДж; $F_{CB} = 3,6$ кН; $F_{КОВ} = 12$ кН; $\tau_{КОВ} = 1,2$ с.

Далее была осуществлена КРС образцов на базовом и энергосберегающем режимах.

Параметры сварочной машины, измеренные экспериментальной установкой, представлены в таблице 5.3. Регистрация действующего тока в первичной цепи (на тиристорном контакторе) осуществлялась посредством стрелочного амперметра с трансформатором тока 600:5 (рисунок 5.3).

В таблице 5.3: I_2 – действующий ток во вторичной цепи (зарегистрирован САУ КРС «Энергия»); I_1 – действующий ток в первичной цепи (амперметр); U_2 – действующее напряжение межэлектродной зоны (САУ КРС «Энергия»); U_1 – действующее напряжение в первичной цепи (регистратор); α – угол открытия тиристорov (регистратор); λ – длительность включенного состояния тиристорov (регистратор).

Таблица 5.3 – Зарегистрированные параметры машины МТ-3201 при КРС на базовом и энергосберегающем режимах

Режим КРС	Регистрируемый параметр						
	I_2 , кА	I_1 , А	U_2 , В	U_1 , В	R_{Σ} , мкОм	α , мс	λ , мс
Базовый режим КРС (для второй ступени импульса тока энергосберегающего режима)	16	490	1,52	334	80	3,9	9,15
Энергосберегающий режим КРС (для первой ступени импульса тока)	7,5	250 (I_1')	1,25	250 (U_1')	132,5	5,55	6,75



Рисунок 5.3 – Регистрация тока в первичной цепи машины МТ-3201

Затем по известной методике [74] путем совмещения кривых тока и напряжения в первичной цепи были определены угол открытия тиристорov,

длительность включенного состояния тиристоров, а также рассчитаны коэффициент мощности $\cos \varphi$, коэффициент использования полной мощности S и коэффициент полезного действия процесса η для обоих случаев КРС (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Сравнение расчетных параметров машины МТ-3201 при КРС на базовом и энергосберегающем режимах

Параметр	Значение		Соотношение величин
	Базовый режим КРС (для второй ступени импульса тока энергосберегающего режима)	Энергосберегающий режим КРС (для первой ступени импульса тока)	
α , град	70,2	99,9	Пропорционально 20 мс – 360 °
λ , град	164,7	121,5	
$\cos \varphi$	0,55	0,68 ($\cos \varphi'$)	[74, с. 97, таблица 2.5]
S	0,149	0,15	$U_2 I_2 / U_1 I_1$
η , %	27	22 (η')	$(S / \cos \varphi) \cdot 100 \%$

Таким образом, погрешность экспериментального определения коэффициента мощности (при КРС конкретного соединения) по сравнению с методикой расчета согласно таблице 5.2 составила 2 %.

Далее для сварочной машины было рассчитано потребление электроэнергии из сети Q_C при КРС на базовом и энергосберегающем режимах, а также величина сетевой электроэнергии $Q_{C(пол)}$, затрачиваемая непосредственно на формирование сварного соединения для обоих случаев (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Сравнение энергетических параметров процесса КРС на базовом и энергосберегающем режимах (для машины МТ-3201)

Параметр	Значение		Формула
	Базовый режим	Энергосберегающий режим	
Q_C , Вт·ч	12,7	8,77	$U_1 I_1 \tau_{БАЗ}$ – для базового $U_1' I_1' \tau_{ЭН1} + U_1 I_1 \tau_{ЭН2}$ – для энергосберегающего
$Q_{C(пол)}$, Вт·ч	1,89	1,31	$U_1 I_1 \tau_{БАЗ} \cos \varphi \eta$ – для базового $U_1' I_1' \tau_{ЭН1} \cos \varphi' \eta' + U_1 I_1 \tau_{ЭН2} \cos \varphi \eta$ – для энергосберегающего

Таким образом, предложенный (энергосберегающий) режим КРС рассматриваемых соединений с двухэтапным дозированным вводом в межэлектродную зону 70 % от расчетного параметра $Q_{ЭЭ}$ (по УТБ) путем задания двухступенчатого импульса тока в конечном счете обеспечивает 30-процентную экономию электроэнергии, потребляемой сварочной машиной из сети, в сравнении с базовым режимом.



Список литературы

- 1 **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
- 2 **Катаев, Р. Ф.** Теория и технология контактной сварки / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Екатеринбург: Урал. ун-т, 2015. – 144 с.
- 3 **Гельман, А. С.** Технология контактной электросварки / А. С. Гельман. – Москва: МАШГИЗ, 1952. – 322 с.
- 4 **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 151 с.
- 5 **Абабков, Н. В.** Технология и оборудование контактной сварки / Н. В. Абабков, М. В. Пимонов. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 258 с.
- 6 **Орлов, Б. Д.** Технология и оборудование контактной сварки / Б. Д. Орлов. – Москва: Машиностроение, 1986. – 352 с.
- 7 **Липа, М.** Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. – Киев: Техника, 1971. – 324 с.
- 8 **Подола, Н. В.** Рельефная сварка многослойных пакетов из электро-технической стали / Н. В. Подола, В. Д. Щеглов // Автоматическая сварка. – 1975. – № 10. – С. 51–55.
- 9 **Григорян, С. С.** Рельефная сварка ушков на машине МТ-1210 / С. С. Григорян // Сварочное производство. – 1978. – № 4. – С. 38.
- 10 **Цымбалюк, А. А.** Исследование при повышенных температурах свойств материалов электродов для контактной сварки / А. А. Цымбалюк // Сварочное производство. – 1980. – № 10. – С. 17–18.
- 11 Справочник по специальным работам. Сварочные работы в строительстве / В. Д. Таран [и др.]. – Москва: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1971. – Ч. 1. – 464 с.
- 12 **Сергевнин, Б. И.** Групповая рельефная сварка сетчатых проволоочных конструкций / Б. И. Сергевнин, А. А. Цымбалюк // Сварочное производство. – 1984. – № 4. – С. 29.
- 13 **Малышев, Б. Д.** Сварка и резка в промышленном строительстве / Б. Д. Малышев. – Москва: Стройиздат, 1977. – 780 с.
- 14 **Путинцев, И. Д.** Полуавтомат для рельефной Т-образной сварки корпусов врезных замков / И. Д. Путинцев, В. Е. Марголин, И. Г. Сиротин // Сварочное производство. – 1987. – № 8. – С. 7.
- 15 **Людвиг, Ю. И.** Технология и оборудование точечной и рельефной сварки / Ю. И. Людвиг. – Киев: Наукова думка, 1976. – 43 с.
- 16 **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.



17 **Серов, П. Г.** Рельефная сварка узлов счетно-вычислительных машин / П. Г. Серов, П. Г. Кучук, Е. М. Беяченкова // Сварочное производство. – 1971. – № 7. – С. 44–45.

18 **Смирнов, А. П.** Сварка с раздавливанием кромок деталей автомобиля ГАЗ-66 / А. П. Смирнов // Автоматическая сварка. – 1971. – № 1. – С. 42–43.

19 **Смирнов, А. П.** Влияние параметров режима рельефной сварки с раздавливанием кромок на прочность соединений / А. П. Смирнов, А. И. Гуляев // Автоматическая сварка. – 1972. – № 6. – С. 63–64.

20 Управление процессом нагрева при рельефной сварке встык стержней с пластинами / Н. М. Трофимов [и др.] // Сварочное производство. – 1978. – № 8. – С. 17–19.

21 **Колотушкин, В. В.** Рельефная сварка деталей ацетиленового генератора с применением флюса / В. В. Колотушкин, А. Ф. Николаев // Сварочное производство. – 1981. – № 9. – С. 33.

22 **Банов, М. Д.** Технология и оборудование контактной сварки / М. Д. Банов. – Москва: Академия, 2008. – 224 с.

23 **Гилевич, В. А.** Особенности образования соединения при рельефной сварке / В. А. Гилевич // Автоматическая сварка. – 1968. – № 12. – С. 35–38.

24 **Чуларис, А. А.** Технология сварки давлением / А. А. Чуларис, Д. Д. Рогозин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 221 с.

25 **Клименко, Ю. В.** Рельефная контактная сварка быстрорежущих сталей с конструкционными / Ю. В. Клименко, В. Н. Баранков // Сварочное производство. – 1985. – № 7. – С. 14–15.

26 Особенности контактной сварки титана ВТ1-0 с низкоуглеродистой сталью / И. В. Пиньковский [и др.] // Сварочное производство. – 1987. – № 5. – С. 11–12.

27 Применение рельефной сварки для создания жаростойкой уплотнительной поверхности автомобильного клапана / Ю. В. Маркин [и др.] // Автоматическая сварка. – 1968. – № 8. – С. 72.

28 Выбор параметров режима рельефной сварки титана со сталью / О. Г. Быковский [и др.] // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 61–64.

29 **Цымбалюк, А. А.** Стойкость контактных электродов технологических линий для производства арматурных элементов / А. А. Цымбалюк // Сварочное производство. – 1980. – № 5. – С. 24–25.

30 Новая серия контактных машин для рельефной сварки / Б. С. Алексеев [и др.] // Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 47–48.

31 **Смоленский, С. Ю.** Рельефная сварка петель / С. Ю. Смоленский, А. С. Павлов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 5. – С. 142–147.

32 Рельефная приварка шпилек к деталям сельскохозяйственных машин / Г. Е. Мамулия [и др.] // Сварочное производство. – 1975. – № 8. – С. 19–21.



33 **Синицын, А. И.** Рельефная сварка фланцев с освинцованными корпусами топливных баков / А. И. Синицын, В. М. Шумилкин // Сварочное производство. – 1976. – № 7. – С. 50.

34 **Козлов, А. Е.** Рельефная сварка закладных деталей / А. Е. Козлов // Сварочное производство. – 1969. – № 3. – С. 20–21.

35 **Тишура, В. И.** Машина для точечной сварки каркасов железобетонных изделий / В. И. Тишура, А. И. Берзин, А. В. Голубев // Автоматическая сварка. – 1971. – № 11. – С. 54–56.

36 **Подола, Н. В.** Рельефная сварка панели электропроигрывателя / Н. В. Подола, Н. Н. Липявка, В. Я. Сазонов // Автоматическая сварка. – 1969. – № 2. – С. 59–60.

37 **Гуляев, А. И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей (в массовом производстве) / А. И. Гуляев. – Москва: Машиностроение, 1969. – 240 с.

38 О внесении изменений и дополнений в Указ Президента Республики Беларусь от 16 янв. 2014 г. № 35 «О вопросах организации производства легковых автомобилей»: Указ Президента Республики Беларусь от 3 дек. 2015 г. № 479 [Электронный ресурс] // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: www.pravo.by/. – Дата доступа: 19.11.2017.

39 Рельефно-точечная сварка деталей платформы автомобиля самосвала ЗИЛ-ММЗ-555 / С. М. Лащивер [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1967. – № 1. – С. 34–36.

40 **Гуляев, А. И.** Рельефная сварка в автостроении / А. И. Гуляев // Автогенное дело. – 1952. – № 11. – С. 16–20.

41 **Гуляев, А. И.** Рельефная сварка в автомобильной промышленности / А. И. Гуляев // Автомобильная промышленность. – 1968. – № 2. – С. 28–31.

42 **Рыкалин, Н. Н.** Тепловые основы сварки. Ч. 1: Процессы распространения тепла при дуговой сварке / Н. Н. Рыкалин. – Москва; Ленинград: АН СССР, 1947. – 271 с.

43 Analysis of heat flow coupled with structural changes in laser transformation hardening process / K. Inoue [et al.] // Transactions of JWRI. – 1990. – Vol. 19, № 2. – P. 89–97.

44 **Кархин, В. А.** Тепловые процессы при сварке / В. А. Кархин. – Санкт-Петербург: Политехн. ун-т, 2015. – 572 с.

45 **Гуляев, А. И.** Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – Москва: Машиностроение, 1985. – 256 с.

46 Теория сварочных процессов / В. В. Фролов [и др.]. – Москва: Высшая школа, 1988. – 559 с.

47 **Багрянский, К. В.** Теория сварочных процессов / К. В. Багрянский, З. А. Добротина, К. К. Хренов. – Киев: Вища школа, 1976. – 424 с.



48 **Поляков, А. Ю.** О необходимости разработки теоретических и технологических основ повышения энергоэффективности процесса контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, В. П. Куликов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 14–21.

49 **Поляков, А. Ю.** Оценка геометрии и теплофизических свойств зоны взаимного расплавления металла при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, В. П. Куликов, А. А. Степанов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 183–184.

50 **Поляков, А. Ю.** Разработка уравнения теплового баланса для расчета требуемой величины сварочного тока при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, В. П. Куликов, Б. В. Федотов // Сварка и диагностика. – 2018. – № 3. – С. 48–52.

51 **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.

52 **Бендик, Т. И.** Рельефная сварка Т-образных соединений с направленной упругопластической деформацией металла: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Т. И. Бендик. – Могилев, 2009. – 140 л.

53 **Mikno, Z.** Projection Welding with Pneumatic and Servomechanical Electrode Operating Force Systems / Z. Mikno // Welding Journal. – 2016. – № 8. – P. 286–299.

54 **Чулошников, П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов / П. Л. Чулошников. – Москва: Машиностроение, 1974. – 231 с.

55 **Фофанов, А. А.** Контактная сварка: справочник / А. А. Фофанов, А. С. Рудаков. – Москва: Машиностроение, 1964. – 112 с.

56 **Хорн, Ф.** Атлас структур сварных соединений: пер. с нем. / Ф. Хорн. – Москва: Металлургия, 1977. – 288 с.

57 **Вагин, Г. Я.** Режимы электросварочных машин / Г. Я. Вагин. – Москва: Энергия, 1975. – 111 с.

58 **Кабанов, Н. С.** Сварка на контактных машинах / Н. С. Кабанов. – Москва: Высшая школа, 1979. – 215 с.

59 **Hess, W. F.** Further studies of projection welding / W. F. Hess, W. J. Childs, R. F. Underhill // Welding journal. – 1949. – Vol. 28, № 1. – P. 15–23.

60 **Hipperson, A. J.** Mechanical properties and welding characteristics of single projections in low carbon mild steel sheet / A. J. Hipperson // Transaction of Institute of Welding. – 1948. – № 4. – P. 69–80.



61 **Гельман, А. С.** Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – Москва: Машиностроение, 1970. – 312 с.

62 **Березиенко, В. П.** Основы технологии современных способов сварки давлением / В. П. Березиенко. – Могилев: ММИ, 1994. – 98 с.

63 **ГОСТ 15878–79.** Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы. – Москва: Гос. ком. СССР по стандартам, 1980. – 11 с.

64 **Hess, W. F.** A study of projection welding / W. F. Hess, W. J. Childs // Welding Journal. – 1947. – № 12. – P. 712–723.

65 **Nippes, E. F.** The projection welding of 0.010- and 0.020-in. steel sheet / E. F. Nippes, J. M. Gerken, J. G. Maciora // Welding Journal. – 1950. – № 9. – P. 441–449.

66 **Nippes, E. F.** Projection welding of steel in heavy gages and in dissimilar thicknesses / E. F. Nippes, J. M. Gerken // Welding Journal. – 1952. – № 3. – P. 113–125.

67 **Harris, J. F.** Projection welding low carbon steel using embossed projection / J. F. Harris, J. J. Riley // Welding Journal. – 1961. – № 4. – P. 363–376.

68 **Cunningham, A.** A fundamental study of projection welding using high speed photography / A. Cunningham, M. L. Begeman // Welding Journal. – 1965. – № 8. – P. 381–384.

69 Влияние деформации и ее скорости на процесс рекристаллизации при контактной сварке «острой гранью» / Э. С. Каракозов [и др.] // Сварочное производство. – 1987. – № 8. – С. 18–21.

70 **Каракозов, Э. С.** Оптимизация параметров режима рельефной контактной сварки «острой гранью» / Э. С. Каракозов // Автоматическая сварка. – 1985. – № 2. – С. 58–60.

71 **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.

72 **Березиенко, В. П.** Некоторые пути повышения качества сварных соединений, выполненных контактной рельефной сваркой / В. П. Березиенко, В. И. Майбуров, А. А. Жебровский // Материалы науч.-техн. конф. – Калуга, 1984. – С. 10–11.

73 Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 21–26.

74 **Климов, А. С.** Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: Физ.-мат. лит-ра, 2011. – 216 с.

75 **Гладков, Э. А.** Управление процессами и оборудованием при сварке / Э. А. Гладков. – Москва: Академия, 2006. – 432 с.



76 **Смирнов, В. В.** Оборудование для контактной сварки / В. В. Смирнов. – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. – 736 с.

77 **Prischmann, W.** Bessere Qualitat beim Widerstandspunktschweissen durch Regelung der Schweißparametr / W. Prischmann // Schweisstechnik. – 1965. – № 9. – Р. 407–408.

78 Способ регулирования электронагрева при точечной и шовной сварке: а. с. SU 662297 / А. С. Васильев, А. И. Комарчев, В. П. Стрельников, О. В. Белахов. – Оpubл. 15.05.1979.

79 Control device for resistance welder: pat. USA 6118095 / Y. Nagano. – Оpubл. 12.09.2000.

80 Машина для контактной точечной сварки: а. с. SU 1368133 / А. И. Потапов, С. С. Сергеев, И. А. Пенкина. – Оpubл. 23.01.1988.

81 Method for monitoring and regulating electrical resistance welding: pat. USA 3932725 / F.-J. Ganowski. – Оpubл. 13.01.1976.

82 Машина для контактной сварки: а. с. SU 287726 / Ф. А. Аксельрод, А. Г. Зильберг. – Оpubл. 24.05.1972.

83 Регулятор энергетического цикла сварки: а. с. SU 1512736 / Л. Ф. Николаев, А. П. Химач. – Оpubл. 07.10.1989.

84 **Поляков, А. Ю.** Об автоматическом регулировании мощности и энергии при рельефной сварке пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, В. П. Березиенко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апр. 2012 г. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 151–152.

85 Способ стабилизации сварочного тока при контактной сварке с тиристорным управлением: а. с. SU 1355409 / Ф. А. Аксельрод, У. У. Ибрагимов, Ю. Е. Иоффе. – Оpubл. 30.11.1987.

86 Constant-current control method of resistance welder: pat. Japan 61123481 / K. Masato. – Оpubл. 11.06.1986.

87 Новые разработки ЗАО «Электрик – МИКС» в области контроля и управления сварочными процессами / Ю. Е. Иоффе [и др.] // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 39–43.

88 Constant current control method in spot welding machine: pat. Japan 62107877 / K. Miyagawa. – Оpubл. 19.05.1987.

89 Система фазового цифрового управления контактной сваркой: а. с. SU 1268346 / Т. И. Квизерели, А. Л. Микеладзе, Э. А. Купатадзе. – Оpubл. 07.11.1986.

90 Method for controlling welding current: pat. USA 4465918 / S. Kiriamia, S. Mikiji. – Оpubл. 14.08.1984.

91 **Патон, Б. Е.** Оптимальная система регулирования энергетических параметров точечной и шовной сварки / Б. Е. Патон, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 1961. – № 2. – С. 32–34.



92 **Орлов, Б. Д.** Контроль точечной и роликовой электросварки / Б. Д. Орлов, П. Л. Чулошников, В. Б. Верденский. – Москва: Машиностроение, 1973. – 304 с.

93 **Owusu-Ofori, S. P.** Signiture analysis of contact voltage of resistance welds / S. P. Owusu-Ofori, S. M. Wu // Welding journal. – 1983. – № 7. – P. 185–189.

94 **Johnson, K. I.** Automatic spot weld correction / K. I. Johnson // Metal Construction and British Welding Journal. – 1977. – № 2. – P. 70–71.

95 Resistance welding: pat. Great Britain 1564562 / V. Boyd. – Оpubл. 10.04.1980.

96 Method of checking quality of resistance welded portion: pat. Japan 54021938 / N. Shuji, N. Masahiro, K. Takashi, K. Katsuhiko. – Оpubл. 19.02.1979.

97 Устройство для управления процессом точечной контактной сварки: а. с. SU 597526 / В. А. Ерофеев. – Оpubл. 23.03.1978.

98 Method and device for controlling resistance welding: pat. Japan 57070091 / T. Masaru, T. Seiju. – Оpubл. 30.04.1982.

99 Method for quality assurance and checking of resistance weld zone: pat. Japan 57127583 / N. Shuji, K. Yoshio, N. Akira. – Оpubл. 07.02.1982.

100 Verfahren zur steuerung der elektrischen arbeit bei punktschweissmaschinen bei gleichzeitiger beruecksichtigung des einem schweisspunkt zugefuehrten elektrischen arbeitsintegrals: pat. FRG 2436671 / G. Drechsler. – Оpubл. 19.02.1976.

101 **Agashe, S.** Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding / S. Agashe, H. Zhang // Welding journal. – 2003. – № 7. – P. 72–77.

102 Method and device for judging quality in spot welding: pat. Japan 3858476 / O. Shuji, T. Hideki. – Оpubл. 13.12.2006.

103 Welding quality discriminating method and device for the same: pat. Japan 2004–160510 / W. Shinichi. – Оpubл. 10.06.2004.

104 Method and apparatus for producing a signal proportional to the electrical resistance across electrodes or workpiece holders: pat. Great Britain 1370869 / D. Siegmund. – Оpubл. 16.10.1974.

105 **Wu, P.** Characterization of Dynamic Mechanical Properies of Resistance Welding Machines / P. Wu, W. Zhang, N. Bay // Welding journal. – 2005. – № 1. – P. 17–20.

106 Устройство для контроля качества точечной и шовной сварки: а. с. SU 814620 / Л. Г. Миронов, Л. К. Афанасьев, Н. В. Петькин. – Оpubл. 23.03.1981.

107 Устройство для контроля качества точечной и шовной сварки: а. с. SU 743811 / Л. Г. Миронов, Л. К. Афанасьев, Г. В. Виноградов. – Оpubл. 30.06.1980.

108 Способ контроля качества точечной и шовной сварки: а. с. SU 761188 / Л. Г. Миронов. – Оpubл. 07.09.1980.

109 **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.

110 **Марченко, А. Л.** Новые методы контроля и автоматического управления при контактной сварке / А. Л. Марченко. – Москва: Машиностроение, 1969. – 169 с.

111 Способ контроля качества контактной сварки: а. с. SU 759265 / Н. В. Абрамов, Р. Н. Грязнов, А. А. Пермяков. – Оpubл. 30.08.1980.

112 **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.

113 **Подола, Н. В.** Адаптивный алгоритм контроля качества контактной точечной сварки на основе нейронной сети / Н. В. Подола, П. М. Руденко, В. С. Гавриш // Автоматическая сварка. – 2002. – № 1. – С. 46–48.

114 **Подола, Н. В.** Выбор входных переменных и структуры нейронной сети для оценки качества контактной точечной сварки / Н. В. Подола, В. С. Гавриш, П. М. Руденко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 3–6.

115 Способ регулирования процесса контактной точечной сварки: пат. РФ 2050237 / С. Н. Козловский, Г. И. Григоров, В. А. Казаков, М. А. Лубнин, А. А. Чакалев. – Оpubл. 20.12.1995.

116 Способ автоматического контроля параметров режима точечной сварки на многотрансформаторной машине контактной сварки: пат. РФ 2113952 / Н. А. Карачев, М. В. Андрюнина. – Оpubл. 27.06.1998.

117 Многофункциональный измеритель параметров точечной контактной сварки: пат. РФ 2110380 / Б. Ф. Афанасьев, Ю. А. Лебедев, А. А. Матвеев, Ю. Е. Иоффе, Т. Г. Шапиро. – Оpubл. 10.05.1998.

118 Способ регулирования и контроля процесса контактной сварки: пат. РФ 2164846 / Н. П. Горун, В. М. Куликов, С. П. Манейкин, П. М. Руденко, В. М. Ягнятинский. – Оpubл. 10.04.2001.

119 Способ управления сварочным током при контактной точечной сварке: пат. РФ 2309030 / А. С. Климов, А. А. Герасимов, Н. П. Анциборов, М. С. Гончаров. – Оpubл. 27.03.2007.

120 **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.

121 **Подола, Н. В.** Компьютерная диагностика контактной сварки / Н. В. Подола, В. С. Гавриш, П. М. Руденко // Автоматическая сварка. – 1994. – № 7. – С. 32–35.

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 Способ контактной точечной и/или рельефной сварки: пат. ВУ 19977 (С1) / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булышко. – Оpubл. 30.04.2016.

125 **Кочергин, К. А.** Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 240 с.

126 Система автоматического управления процессом рельефной сварки: пат. ВУ 10481 (U) / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булышко. – Оpubл. 30.12.2014.

127 **Поляков, А. Ю.** Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 75–84.

128 **Фурманов, С. М.** R–U-характеристики свариваемых контактов при точечной и рельефной сварке / С. М. Фурманов, И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 43.

129 **Поляков, А. Ю.** О внешнем управлении параметрами режима контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков, Н. М. Михайлова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Могилев, 17–18 нояб. 2011 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 125.

130 **Поляков, А. Ю.** Об автоматическом регулировании мощности и энергии при рельефной сварке пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, В. П. Березиенко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апр. 2012 г. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 151–152.

131 **Курлович, И. В.** Определение динамических характеристик контактных сопротивлений при точечной сварке в среде LABVIEW / И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Исследование и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы X Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 29–30 апр. 2010 г. – Гомель: Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 2010. – С. 107–110.

132 **Курлович, И. В.** Управление размерами литого ядра при контактной точечной сварке / И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Информационные технологии, энергетика и экономика: материалы 6 Межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Смоленск, 9–12 апр. 2009 г. – Смоленск: Смолен. фил. Моск. энергет. ин-та, 2009. – С. 73–76.



133 **Поляков, А. Ю.** Контроль параметров процесса контактной точечной и рельефной сварки / А. Ю. Поляков, И. В. Курлович // Материалы 45 студен. науч.-техн. конф., Могилев, 18–22 мая 2009 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 171.

134 **Курлович, И. В.** Управление качеством рельефной сварки по скорости перемещения верхнего электрода / И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Материалы 45 студен. науч.-техн. конф., Могилев, 18–22 мая 2009 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 112.

135 **Курлович, И. В.** Программное управление регулятором цикла сварки / И. В. Курлович, А. Ю. Поляков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Могилев, 19–20 нояб. 2009 г. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 54.

136 Оптимизация количества энергии, вводимой в зону рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 67–77.

137 **Поляков, А. Ю.** Энергоэффективность процесса управления сварочной машиной в режиме реального времени при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Б. В. Федотов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 3. – С. 51–55.

138 **Моравский, В. Э.** Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки / В. Э. Моравский, Д. С. Ворона. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.

139 **Поляков, А. Ю.** О формировании ступенчатых соединений при контактной рельефной сварке / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 4. – С. 62–69.

140 **Николаев, Г. А.** Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – Москва: Машиностроение, 1971. – 760 с.

141 **Колосов, В. И.** Совершенствование технологии контактной точечной сварки / В. И. Колосов, Р. А. Мусин, А. И. Садилов // Вестн. Перм. гос. техн. ун-та. – 2002. – С. 200–210.

142 **Малышев, Б. Д.** Сварка и резка в промышленном строительстве: справочник / Б. Д. Малышев, А. И. Акулов, Е. К. Алексеев. – Москва: Стройиздат, 1989. – Т. 1. – 590 с.

143 **Trommer, G.** Resistance spot welding using continuous tape / G. Trommer // Welding Journal. – 2009. – № 12. – P. 20–22.

144 **Поляков, А. Ю.** Методика расчета параметров режима рельефной сварки пакетных соединений / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. Донбас. машиностроит. акад. – 2012. – № 3. – С. 226–231.



145 **Полухин, П. И.** Соппротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – Москва: Металлургия, 1983. – 352 с.

146 **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.

147 **Попов, В. М.** Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. – Москва: Энергия, 1971. – 216 с.

148 **Березиенко, В. П.** Об особенностях математического моделирования процесса контактной рельефной сварки листовых низкоуглеродистых сталей / В. П. Березиенко, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 23–27.

149 Электротермодеформационный расчёт процессов контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 77–85.

150 **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.

151 **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 IV Междунар. науч.-техн. семинара. – Санкт-Петербург: Ин-т сварки России, 2008. – С. 54–59.

152 Development of an energy-saving method of resistance projection welding of multilayer welded structures / A. Yu. Polyakov [et al.] // Welding international. – 2017. – № 8. – P. 868–873.

153 Разработка энергосберегающего способа контактной рельефной сварки многослойных сварных конструкций / А. Ю. Поляков [и др.] // Сварочное производство. – 2017. – № 1. – С. 14–20.

154 **Поляков, А. Ю.** О формировании соединений при рельефной сварке пакета по схеме рельеф–пластина–рельеф / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. конф. молодых ученых, Могилев, 18–19 нояб. 2010 г. – Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 75.

155 Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.

156 **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.



157 О регулировании тепловложения в межэлектродную зону при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 48–59.

158 Разработка энергосберегающего технологического процесса контактной рельефной сварки кронштейна лифта по кольцевому рельефу / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 51–62.

159 Об обеспечении прочности соединений, получаемых способом контактной рельефной сварки, без образования литого ядра / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 75–81.

160 Экспериментальное определение энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 74–83.

161 **Поляков, А. Ю.** Влияние энергосберегающей технологии контактной рельефной сварки на твердость металла соединений из низкоуглеродистых сталей / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Б. В. Федотов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 1. – С. 38–43.

162 **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.

163 **ГОСТ Р ИСО 15614–1–2009.** Технические требования и аттестация процедур сварки металлических материалов. Проверка процедуры сварки. Ч. 1: Дуговая и газовая сварка сталей и дуговая сварка никеля и никелевых сплавов. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 28 с.

164 **ГОСТ Р ИСО 15614–12–2009.** Технические требования и аттестация процедур сварки металлических материалов. Проверка процедуры сварки. Ч. 12: Точечная, шовная и рельефная сварка. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 12 с.

165 **Куликов, В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск: Экоперспектива, 2003. – 415 с.

166 **Глебов, Л. В.** Устройство и эксплуатация контактных машин / Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, П. Л. Чулошников. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.

167 **Рыськова, З. А.** Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жемерева. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 423 с.



Оглавление

Введение.....	3
1 Особенности процесса контактной рельефной сварки и идея снижения его энергоемкости.....	4
1.1 Контактная рельефная сварка (КРС) и области ее применения.....	4
1.2 Процессы, происходящие при КРС.....	12
1.3 Методики определения основных параметров режима КРС.....	17
1.4 Проблематика расчета уравнения теплового баланса применительно к случаю КРС.....	25
1.5 Сопротивление межэлектродной зоны при КРС.....	33
1.6 Структура рельефных сварных соединений, получаемых с взаимным расплавлением металла свариваемых деталей.....	37
1.7 Рельефные сварные соединения в твердой фазе, получаемые без взаимного расплавления металла свариваемых деталей.....	39
1.8 Постадийный механизм образования рельефных сварных соединений: образование твердой фазы и взаимное расплавление металла деталей с появлением общих зерен.....	42
2 Разработка способа и средств снижения энергоемкости процесса КРС.....	50
2.1 Аппаратура управления процессом КРС.....	50
2.2 Существующие системы и способы корректировки основных параметров режима КРС и точечной сварки.....	52
2.3 Разработка способа КРС с поэтапным дозированным вводом энергии в межэлектродную зону.....	67
2.4 Разработка системы автоматического управления процессом КРС.....	69
2.5 Аналого-цифровое устройство сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS.....	76
2.6 Разработка графического программного кода для автоматического управления процессом КРС в реальном времени в среде LABVIEW.....	78
2.7 Разработка прибора САУ КРС «Энергия» и его тарировка.....	95



3 Анализ энергетических показателей процесса КРС с пониженной энергоемкостью	108
3.1 Пакетные соединения как объект для проведения первых экспериментальных исследований процесса КРС с регулируемым вводом энергии в межэлектродную зону.....	108
3.2 Разработка методики расчета требуемой длительности протекания сварочного тока и его величины для КРС пакетных нахлесточных соединений.....	113
3.3 Конечно-элементное моделирование этапов кинетики формирования пакетных нахлесточных соединений при КРС.....	121
3.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС.....	136
3.5 Анализ влияния центровочных отверстий в деталях на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС.....	142
4 Особенности формирования рельефных соединений с расплавлением металла деталей и без при пониженной энергоемкости процесса КРС.....	148
4.1 Процесс трехэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС засовов замков по круглым рельефам).....	148
4.2 Анализ влияния повышенного ковочного усилия, прикладываемого к электродам, на процесс КРС с трехэтапным дозированным введением энергии в межэлектродную зону	157
4.3 Процесс двухэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС кронштейнов лифтов по кольцевым рельефам)	165
4.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на процесс образования рельефных сварных соединений без расплавления.....	170
4.5 Анализ влияния циклограммы нагрева межэлектродной зоны на твердость металла соединений при КРС.....	179
5 Методика определения энергопотребления сварочной машины при КРС.....	188
Список литературы.....	195





Научное издание

Поляков Андрей Юрьевич

**СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССОВ
КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ**

Редактор *Т. А. Рыжикова*

Художественное оформление обложки *В. П. Бабичева*

Технический редактор *А. А. Подошевка*

Компьютерный дизайн *Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 2.01.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 12,21. Уч.-изд. л. 13,43. Тираж 100 экз. Заказ № 1.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.