

А. Ю. ПОЛЯКОВ

**СНИЖЕНИЕ
ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССОВ
КОНТАКТНОЙ
РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ**

2-е издание



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.791
ББК 34.641
П54

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Республики Беларусь,
чл.-кор. НАН Беларуси, зав. кафедрой порошковой металлургии,
сварки и технологии материалов Белорусского национального
технического университета *Ф. И. Пантелеенко*;
д-р техн. наук, проф., профессор Высшей школы физики
и технологии материалов Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого *С. Г. Паршин*;
д-р техн. наук, проф. *В. П. Березиенко*

Поляков, А. Ю.

П54

Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки :
монография / А. Ю. Поляков. – 2-е изд., доп. – Москва ; Вологда : Инфра-
Инженерия, 2020. – 216 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0459-4

Освещены вопросы энергосбережения в сварочном производстве. Рассмотрена контактная рельефная сварка как перспективная разновидность сварки давлением. Уделено внимание возможности получения рельефных соединений как с расплавлением металла свариваемых деталей, так и без расплавления (в твердой фазе) путем реализации циклограмм нагрева межэлектродной зоны, отличных от рекомендуемых в литературе.

Для специалистов в области сварки, студентов машиностроительных направлений подготовки и научных работников.

УДК 621.791
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-0459-4

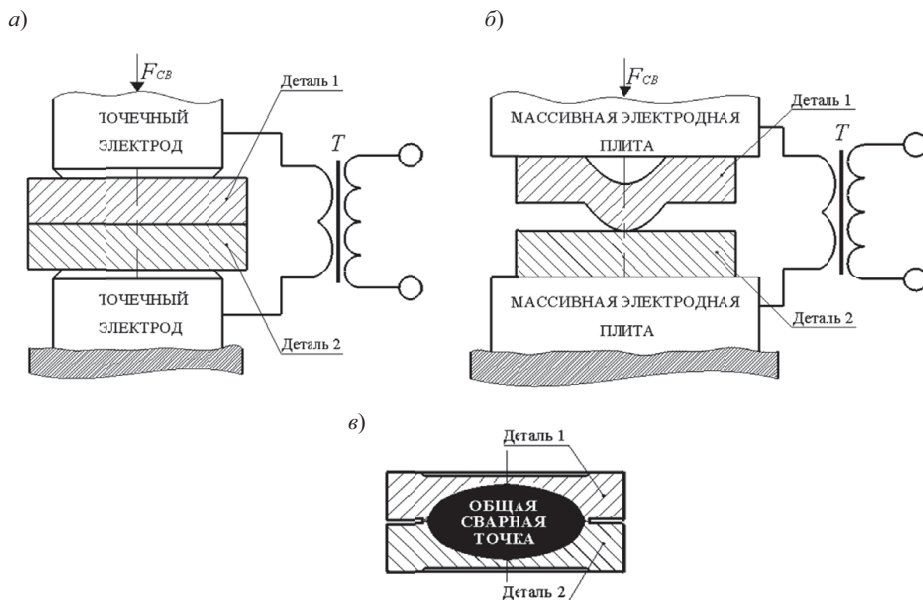
© Поляков А. Ю., 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

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).



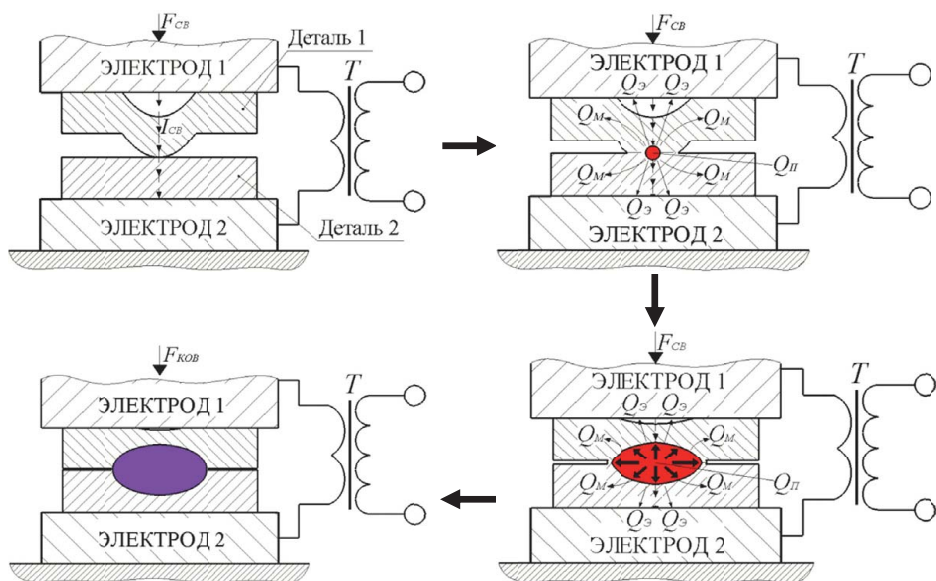
а – точечная сварка; б – рельефная сварка;
в – сварная точка (F_{CB} – усилие сжатия электродов; T – сварочный трансформатор)

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].

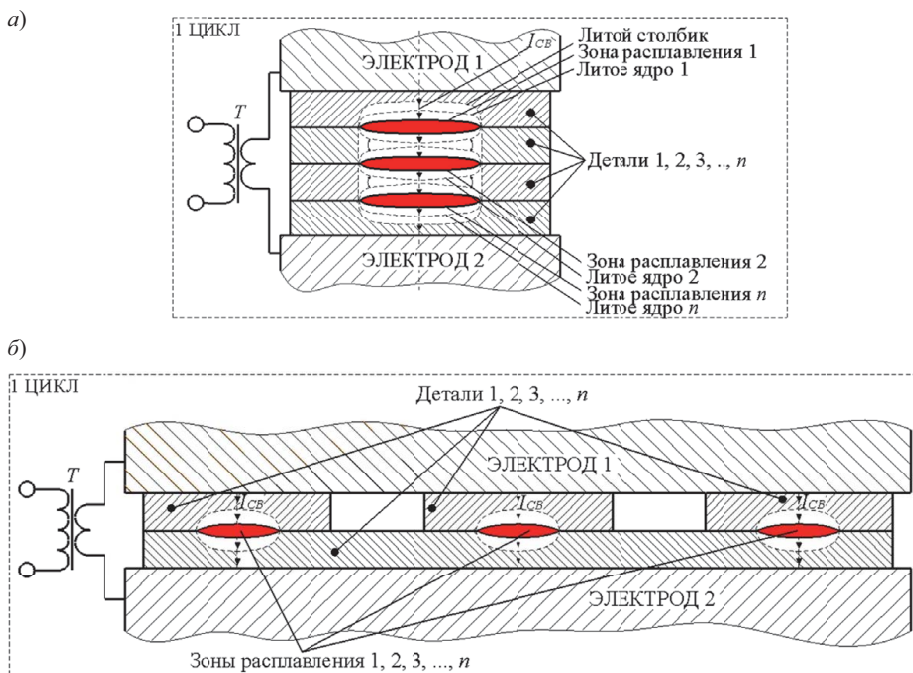


-  – условный объем перегретого металла в зоне максимальной плотности тока;
-  – область взаимного расплавления, растущая до закрытия зазора между деталями;
-  – литое ядро (сварная точка) после кристаллизации под действием усилияковки

Q_{π} , Q_M , Q_{ϵ} – полезная энергия нагрева, энергия теплоотвода в основной металл деталей и в электроды соответственно; I_{CB} – 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 – при последовательном и параллельном протекании тока через детали соответственно

Рисунок 1.3 – Схема процесса КРС пакетного соединения

Помимо необходимости получения нахлесточных соединений, состоящих из плоских деталей [9], КРС широко применяется 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, *з*) [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].

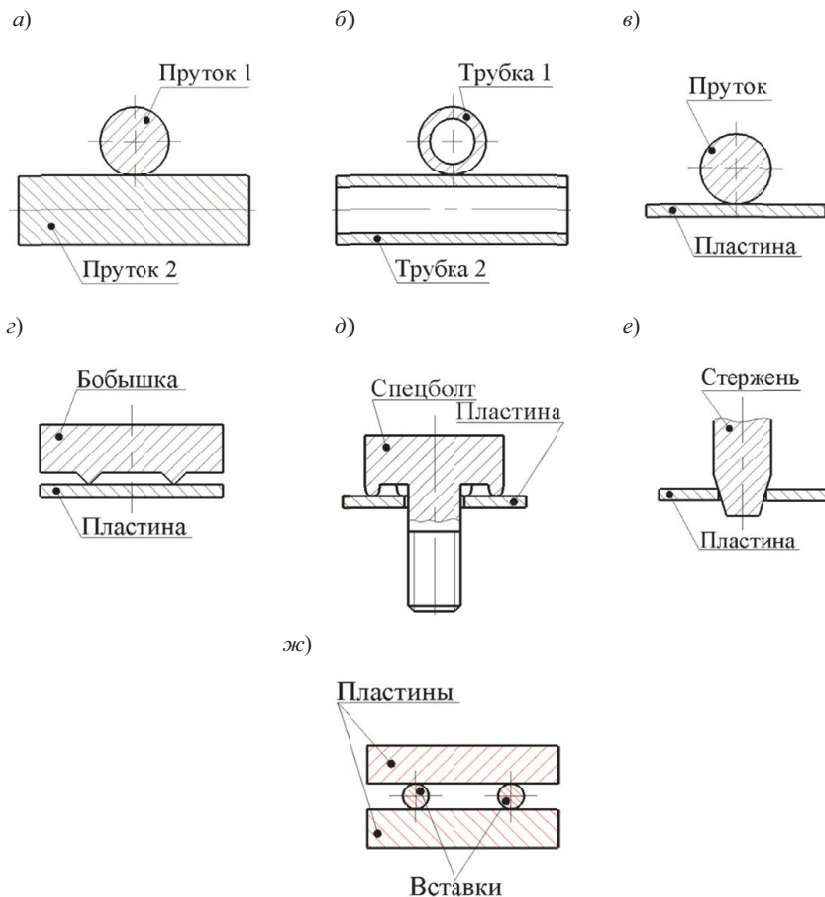


Рисунок 1.4 – Схемы взаимного расположения деталей перед КРС различных соединений (кроме нахлесточных соединений пластин)

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

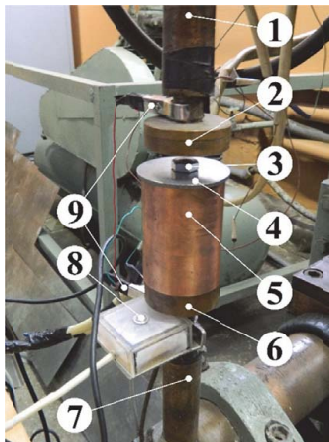
Следует отметить, что для процесса КРС характерна интенсивная радиально направленная пластическая деформация металла в зоне контакта деталь – деталь, в 10–15 раз большая, чем при КТС [1]. Поэтому если сравнить процессы КТС и КРС в условиях схожих колебаний величины и длительности протекания импульса 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 тириستоров системы управления, вторичной обмотки сварочного трансформатора, а также токоведущих элементов вторичного контура контактной машины.

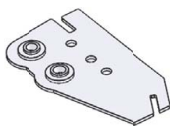
В сравнении с дуговой сваркой КРС является не только высокопроизводительным способом соединения тонко- и среднетолщинного листового металла, но и безопасным процессом с высокой культурой производства. В процессе КРС отсутствуют выбросы токсичных газов, ультрафиолетовое излучение и повышенный уровень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

Однако вследствие воздействия 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.

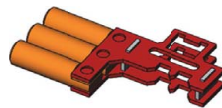
В промышленности способом КРС изготавливают узлы лифтов (кронштейны, петли и др.) [31], сельскохозяйственной техники (фиксаторы, держатели, проушины и др.) [32], легковых и грузовых автомобилей (тормозные колодки и др.) [33], арматурные узлы (плоские, прямоугольные и цилиндрические объемные каркасы, 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).



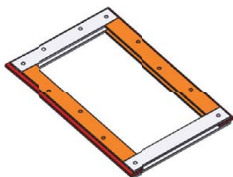
Узлы пассажирского лифта



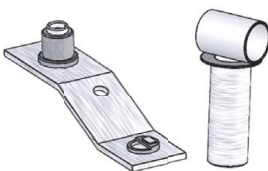
Кронштейн трактора



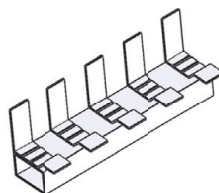
Засов дверного замка



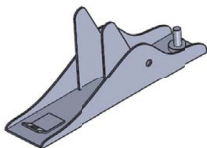
Рамка печной двери



Узлы мотоцикла



Балка фермы



Колодка рубанка



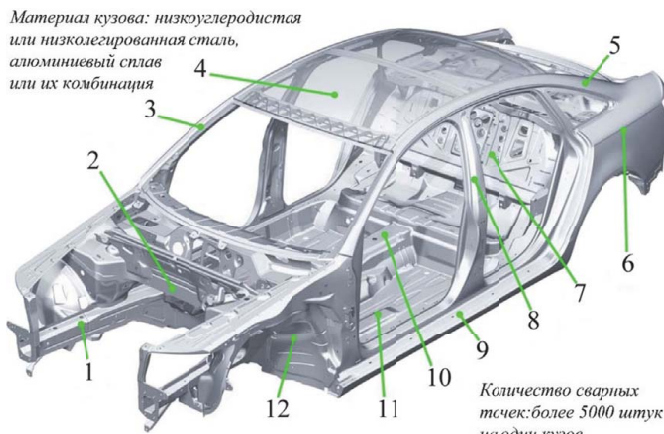
Тормозная колодка автомобиля



Корпус фонаря

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, 11 355 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 1820 %) 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 применяются и обычные точечные электроды (название процесса «точно-

рельефная сварка») [39]. Толщина свариваемого металла элементов кузова редко превышает 3 мм, поэтому штамповка рельефов незатруднительна [40, 41].

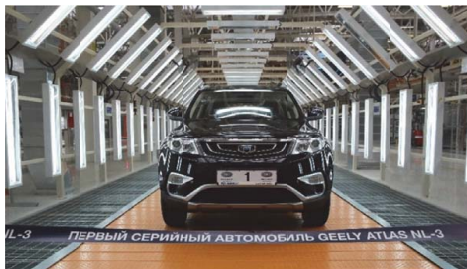


Рисунок 1.9 – Первый легковой автомобиль, произведенный в Республике Беларусь

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:

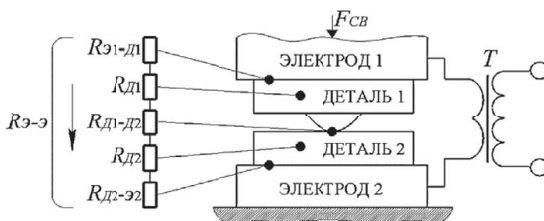
- формой и размерами рельефа (например, при сварке нахлесточных соединений по круглому выштампованному рельефу концентрация линий протекания тока увеличивается от его центра к периферии);
- характером нагрева материалов свариваемых деталей и электродов (вид, форма и длительность протекания импульса тока, 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 стали 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 $R_{\Sigma\Sigma}$, 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).



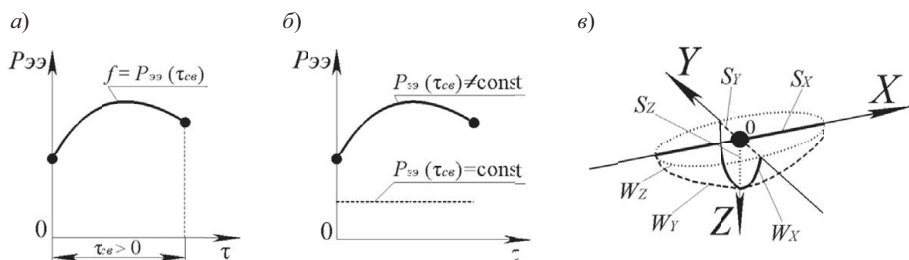
$R_{\Sigma 1-Д1}$ – сопротивление контакта «электрод 1 – деталь 1»; $R_{Д1}$ – собственное сопротивление детали 1; $R_{Д1-Д2}$ – сопротивление контакта «деталь 1 – деталь 2»; $R_{Д2}$ – собственное сопротивление детали 2; $R_{Д2-Э2}$ – сопротивление контакта «деталь 2 – электрод 2»

Рисунок 1.10 – Схема электрического сопротивления межэлектродной зоны $R_{\Sigma\Sigma}$ 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 $0,1 \dots 1,5$ 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).

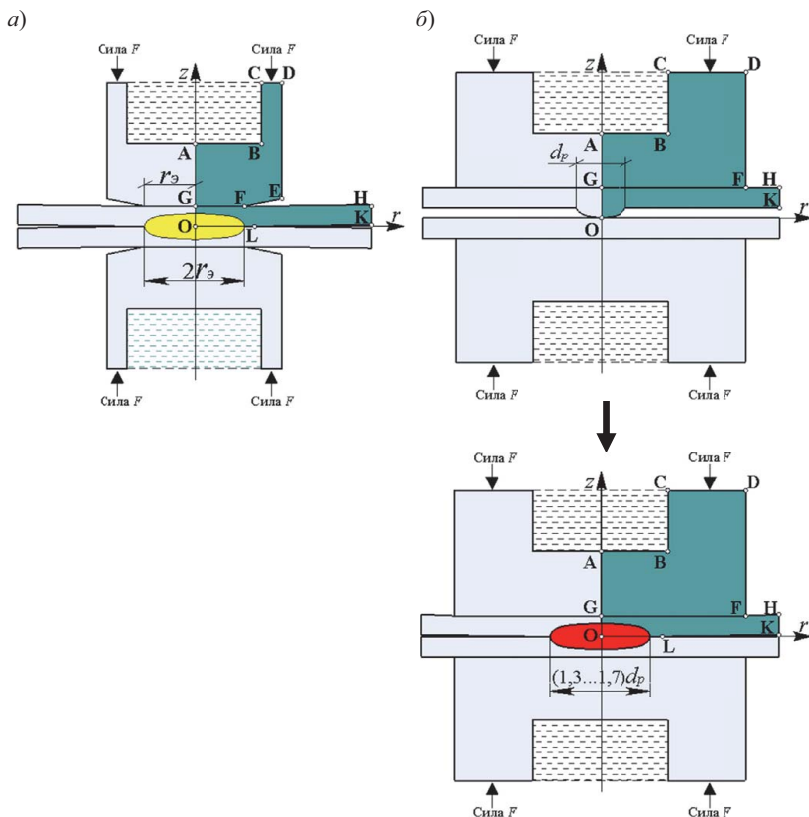


а – непрерывно-действующий источник; б – источник переменной мощности;
 в – объемный источник ($P_{\text{ээ}}$ – мощность межэлектродной зоны; τ – время; $\tau_{\text{св}}$ – длительность протекания импульса тока; $f = P_{\text{ээ}}(\tau_{\text{св}})$ – функция изменения мощности межэлектродной зоны 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 ОАВСDEFНKLO [44]. На рисунке 1.12, б (схема КРС) электроды попарно одинаковы, а детали неодинаковы, т. к. на верхней из них имеется круглый рельеф.



$r_э$ – 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 ОАВСDEFHKO, а при протекании тока с момента включения и до выключения – границей ОАВСDEFH KLO.

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).

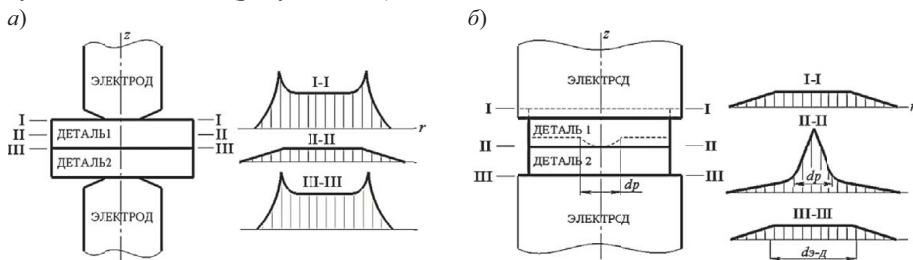


Рисунок 1.13 – Распространение плотности тока относительно оси z при КТС (а) и КРС (б)

Следует отметить, что по своей сути вышеописанный высокотемпературный 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 ; пауз между импульсами I_{CB} , $I_{ПОД}$, $I_{ТО}$;
- количество импульсов I_{CB} , $I_{ПОД}$ 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_{CB} до, во время и после протекания импульса I_{CB} ;
- с приложением $F_{КОВ}$ в момент выключения импульса I_{CB} ;
- с приложением $F_{КОВ}$ перед моментом включения импульса I_{CB} ;
- с приложением $F_{КОВ}$ до включения импульса I_{CB} , 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_{CB} 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.

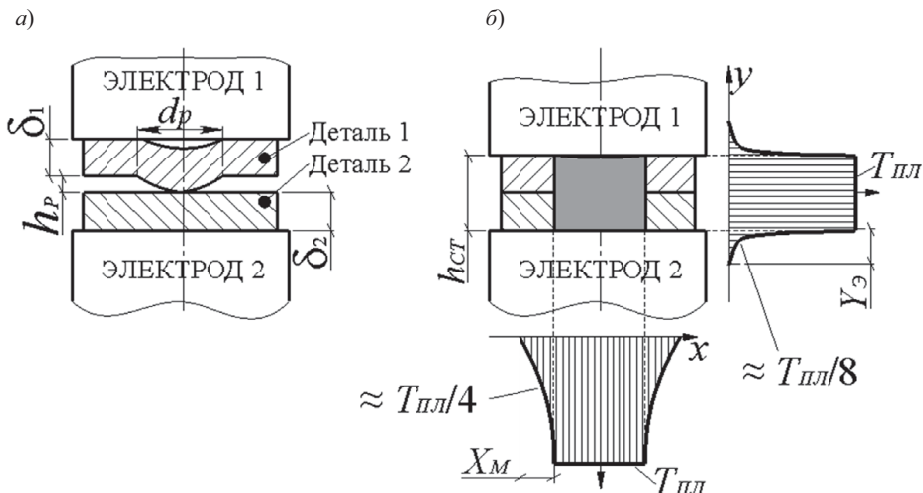


Рисунок 1.14 – Геометрия рельефного соединения перед сваркой (а) и расчетная схема уравнения теплового баланса (б)

Далее составляется УТБ и приводятся формулы расчета его составляющих:

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

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

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

$$Q_э = 2V_э K_2 c_э \gamma_э (0,125 T_{пл}), \quad (1.4)$$

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 $0,25 T_{пл}$ при теплоотводе;

$2V_э$ – суммарный объем условных столбиков металла двух одинаковых электродов, нагреваемых до температуры около $0,125 T_{пл}$ 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 $K_2 = 2$);

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.....	66
2.4 Разработка системы автоматического управления процессом КРС	69
2.5 Аналого-цифровое устройство сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS	75
2.6 Разработка графического программного кода для автоматического управления процессом КРС в реальном времени в среде LABVIEW.....	77
2.7 Разработка прибора САУ КРС «Энергия» и его тарировка.....	94
3. Анализ энергетических показателей процесса КРС с пониженной энергоемкостью	107
3.1 Пакетные соединения как объект для проведения первых экспериментальных исследований процесса КРС с регулируемым вводом энергии в межэлектродную зону.....	107
3.2 Разработка методики расчета требуемой длительности протекания сварочного тока и его величины для КРС пакетных нахлесточных соединений	112

3.3 Конечно-элементное моделирование этапов кинетики формирования пакетных нахлесточных соединений при КРС	120
3.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС	135
3.5 Анализ влияния центровочных отверстий в деталях на сопротивление межэлектродной зоны и энергетические показатели процесса КРС	141
4. Особенности формирования рельефных соединений с расплавлением металла деталей и без него, а также при пониженной энергоемкости процесса КРС	147
4.1 Процесс трехэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС засовов замков по круглым рельефам).....	147
4.2 Анализ влияния повышенного ковочного усилия, прикладываемого к электродам, на процесс КРС с трехэтапным дозированным введением энергии в межэлектродную зону	156
4.3 Процесс двухэтапного дозированного введения энергии в межэлектродную зону (на примере КРС кронштейнов лифтов по кольцевым рельефам)	163
4.4 Анализ влияния усилия сжатия электродов и величины сварочного тока на процесс образования рельефных сварных соединений без расплавления.....	169
4.5 Анализ влияния циклограммы нагрева межэлектродной зоны на твердость металла соединений при КРС	177
5. Способ обеспечения прочности рельефных сварных соединений за счет формирования общей кольцевой зоны металла деталей вместо ядра точки	185
6. Методика определения энергопотребления сварочной машины при КРС	196
Список литературы.....	202