

УДК 621.7

О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

А. Ю. ПОЛЯКОВ

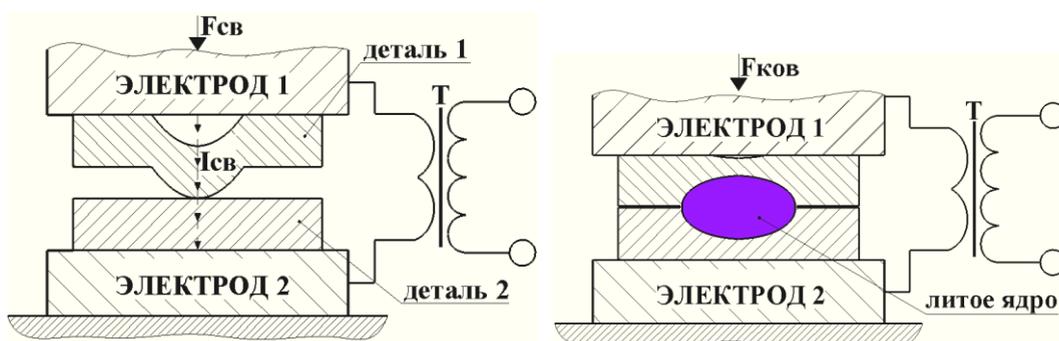
Научный консультант В. П. КУЛИКОВ, д-р техн. наук, проф.

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Могилев, Беларусь

Контактная рельефная сварка (КРС) является разновидностью контактной точечной сварки (КТС) и ее сущность заключается в том, что получение неразъемного соединения двух и более деталей за один цикл происходит в результате пропускания высокоамперного импульса (импульсов) сварочного тока через заготовки, сжатые между электродами, причем на одной или на нескольких из заготовок имеются выступы (рельефы) (рис. 1) [1, 2].

а)



б) в начале процесса

в конце процесса

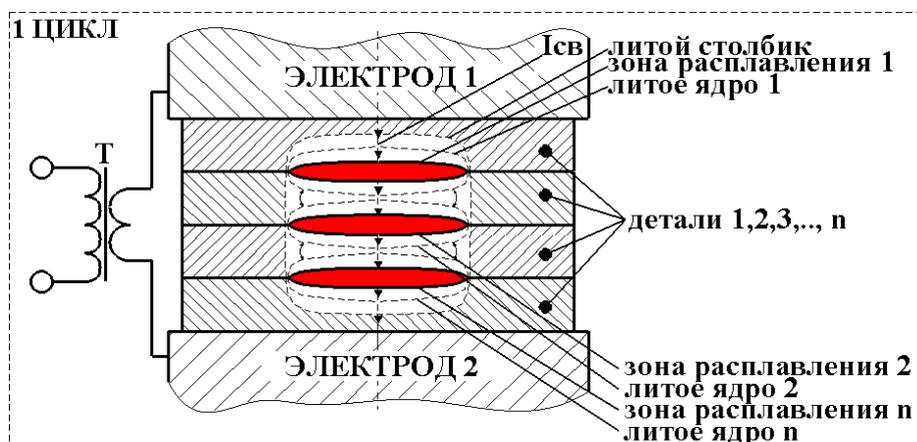


Рис. 1. Схема процесса КРС нахлесточного соединения, состоящего из двух (а) и четырех деталей (б): Т – сварочный трансформатор; $I_{св}$ – сварочный ток; $F_{св}$ – усилие сжатия электродов; $F_{ков}$ – ковочное усилие

Наличие рельефов дает важное преимущество КРС перед КТС. Линии протекания сварочного тока концентрируются у вершин рельефов в контактах «деталь–деталь» малой площади, которые к моменту выключения тока определяются диаметрами самих рельефов [3]. Это позволяет осуществлять концентрированный полезный нагрев металла заготовок благодаря высокой плотности тока, достигающей 400 А/мм^2 [4].

При этом в сравнении с дуговой сваркой КРС является не только высокопроизводительным способом соединения тонколистового металла при использовании специализированных рельефных прессов, но и безопасным процессом с высокой культурой производства.

Область применения КРС в Республике Беларусь ранее ограничивалась узлами арматуры железобетона, сельскохозяйственной и грузовой техники, лифтов, товарами широкого народного потребления (засовы дверных замков, рамки дверец печных, колодки рубанков и др.).

Сегодня перспективным направлением является применение КРС при изготовлении кузовов легковых автомобилей (например, марки Geely) наряду с КТС. Для этого не требуется применение специализированного оборудования, и робототехнические комплексы КТС, при наличии соответствующих комплектов электродов, способны выполнять данную задачу. Стоит отметить, что на один автомобильный кузов приходится более 5000 сварных точек [5].

Общая отличительная особенность оборудования, применяемого для КРС/КТС, состоит в использовании регулятора цикла сварки для управления всем процессом. Его задача состоит в первоначальной настройке таких основных параметров режима, как величина импульса сварочного тока $I_{\text{СВ}}$ и длительность его протекания $\tau_{\text{СВ}}$, а также в обеспечении общей циклограммы процесса сварки [6].

По контактной сварке имеется единственная методика расчета величины тепловой энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, необходимой для формирования рельефного сварного соединения. Она состоит в расчете уравнения теплового баланса (УТБ) на основе известных геометрических и теплофизических характеристик материалов деталей и электродов, а также рекомендуемых значений $\tau_{\text{СВ}}$ и сопротивления межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}}$. По УТБ рассчитывается значение $Q_{\text{ЭЭ}}$, после чего определяется требуемое значение $I_{\text{СВ}}$ по закону Джоуля – Ленца [1, 3, 5, 7, 8].

Проблематика расчета УТБ состоит в его трех особенностях.

Во-первых, расчет полезной энергии $Q_{\text{ПОЛ}}$, затрачиваемой непосредственно на формирование зоны взаимного расплавления деталей, основан на предположении, что условный столбик металла будущей точки расплавляется полностью.

Во-вторых, расчет энергии теплоотвода в основной металл $Q_{\text{М}}$ основан на предположении, что условное кольцо металла вокруг будущей точки всем своим объемом нагревается до $1/4$ от температуры плавления материала свариваемых деталей.





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 $1/8$ температуры плавления материала свариваемых деталей.

Если совместить предполагаемые размеры сварной точки, задаваемые в УТБ, а также макрошлиф и разрез реальной точки, полученной при КРС на режимах в соответствии с УТБ, то очевидным является несоответствие этих размеров (рис. 2).

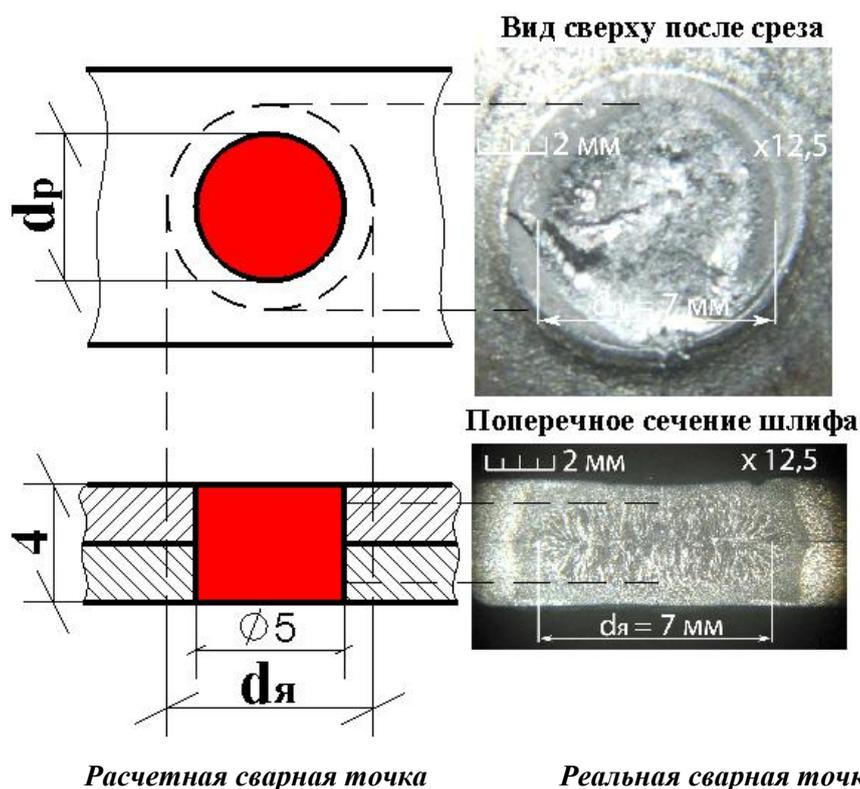


Рис. 2. Сравнение расчетной (по УТБ) и реальной сварных точек при КРС двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной $2 + 2$ мм по одному круглому выштампованному рельефу $5 \times 1,2$ мм ($d_{я}$ – диаметр литого ядра)

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 (см. рис. 2). 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 режиме в соответствии с УТБ при вводе в межэлектродную зону расчетной $Q_{ЭЭ}$ определенная ее часть расходуется на дополнительный теплоотвод в основной металл и электроды.

Данный факт подтверждают результаты конечно-элементного моделирования электротермодеформационных процессов при КРС (рис. 3).

Форма смоделированной точки схожа с реальным шлифом и отличается от расчетной по УТБ (по аналогии с рис. 2) [9].

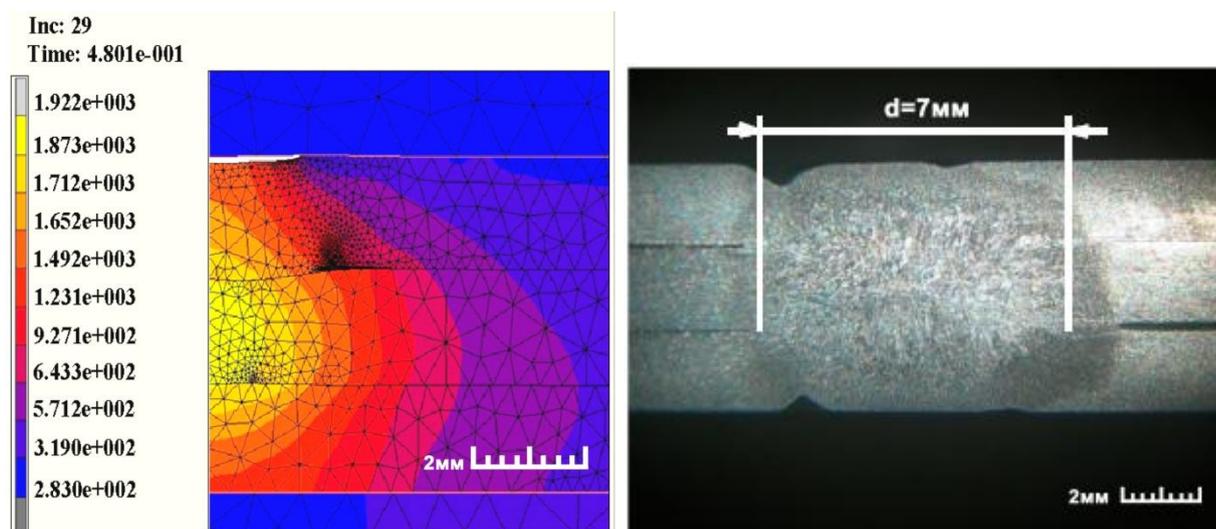


Рис. 3. Сравнение шлифа и результата моделирования процесса КРС пластин толщиной 2 + 2 + 2 мм в среде MSC.MARC (d – диаметр литой зоны)

При этом, согласно общепринятой методике, перед расчетом УТБ, параметр τ_{CB} первоначально выбирается из литературных рекомендаций, которые существенно разнятся. К примеру, для КРС соединения, состоящего из двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм (при сварке по одному круглому выштампованному рельефу габаритами 5 × 1,2 мм) рекомендуемое значение τ_{CB} составляет:

- а) 0,25...0,35 с по А. С. Гельману (1985) [7];
- б) 0,3...0,5 с по В. А. Гилевичу (1976) [3];
- в) 0,32 с по В. П. Березиенко (2009) [1];
- г) 0,28 с по А. И. Гуляеву (1985) [5];
- д) 0,5 с по Б. Д. Орлову (1986) [8].

Необходимо отметить, что первоначально УТБ было разработано и применено к процессу КТС, после чего многие исследователи предложили использовать его и для КРС, отождествляя эти процессы. Однако корректировок, связанных с динамикой изменения параметра $R_{ЭЭ}$ как наиболее трудноанализируемого в процессе нагрева при наличии рельефа, в УТБ внесено не было.

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 завышаются (рис. 4).

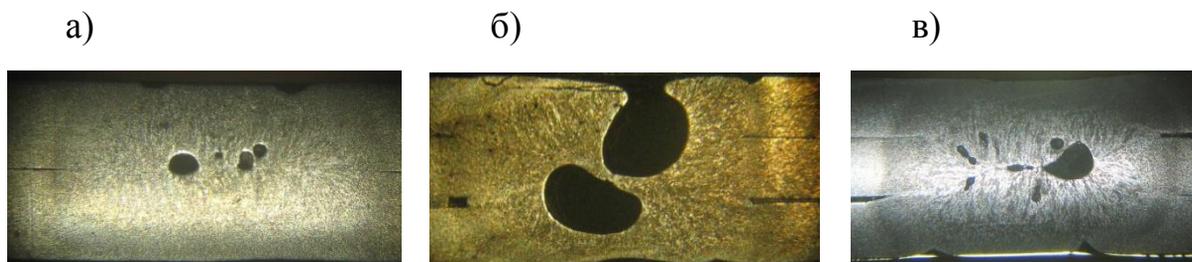


Рис. 4. Дефекты КРС от начального внутреннего выплеска: а – порообразование; б – порообразование с прожогом; в – рыхлоты и раковины

В ряде случаев указанные дефекты существенно уменьшают технологическую прочность соединений (при воздействии эксплуатационных нагрузок). К примеру, если визуально наблюдать процесс роботизированной КРС/КТС 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 возможного снижения прочности отдельных сварных точек, производители в таком случае вынужденно увеличивают их общее количество в ущерб экономической целесообразности.

Таким образом, можно заключить, что резерв повышения энергоэффективности процесса КРС, под которой можно понимать соотношение «минимальное тепловложение в межэлектродную зону – достаточная технологическая прочность соединения», до сих пор не раскрыт.

Для возможности адекватного расчета параметров режима КРС и повышения энергоэффективности данного процесса требуется переработка существующего УТБ с помощью пересмотра теоретических основ, объясняющих специфику электротермодеформационных процессов, происходящих при КРС.

Вторым направлением при решении данной проблемы является работа с существующим УТБ и поиск путей оптимизации расчетной величины тепловой энергии, требуемой для ввода в межэлектродную зону, и, соответственно, величины энергопотребления сварочной контактной машины.

В качестве исходной точки исследований было принято второе направление как наиболее реализуемое и апробируемое на практике.

Первоначально была разработана экспериментальная установка на базе аналого-цифрового устройства сбора данных NATIONAL INSTRUMENTS (производитель – США) и среды графического программирования LABVIEW, позволяющая осуществлять автоматическое управление сварочной контактной машиной в режиме реального времени с игнорированием первоначальных настроек регулятора цикла сварки [10].

Далее был разработан и запатентован способ КРС, сущность которого отличается от известных способов и заключается в дозированном введении электрической энергии в межэлектродную зону путем задания многоступенчатого импульса сварочного тока [11].

Реализация предложенного способа КРС на практике стала возможной благодаря разработке системы автоматического управления данным процессом САУ КРС «ЭНЕРГИЯ» (САУ КРС), схема которой также была запатентована [12].

При экспериментах было принято допущение, что электрическая энергия, вводимая в межэлектродную зону, полностью преобразуется в тепловую.

Было предположено, что добиться повышения энергоэффективности процесса КРС можно путем повременного разбиения параметра $Q_{ЭЭ}$ на части в различных комбинациях со значениями задаваемых токов (подогрева $I_{ПОД}$, сварки $I_{СВ}$, термообработки $I_{ТО}$).

После отработки различных возможных комбинаций было принято решение остановиться на двух вариантах:

а) трехступенчатый импульс тока, состоящий из токов $I_{ПОД}$, $I_{СВ}$ и $I_{ТО}$, с трехэтапным дозированным вводом $Q_{ЭЭ}$ в соотношении «ввод 5 % от $Q_{ЭЭ}$ при $I_{ПОД} = I_{ТО} = 0,5I_{СВ}$ на этапах № 1 и 3 – ввод 90 % от $Q_{ЭЭ}$ при $I_{СВ}$ на этапе № 2»;

б) двухступенчатый импульс тока, состоящий из токов $I_{ПОД}$ и $I_{СВ}$, с двухэтапным дозированным вводом $Q_{ЭЭ}$ в соотношении «ввод 5 % от $Q_{ЭЭ}$ при $I_{ПОД} = 0,5I_{СВ}$ на этапе № 1 – ввод 45 % от $Q_{ЭЭ}$ при $I_{СВ}$ на этапе № 2».

Первый вариант был апробирован при сварке засовов замков дверных на ОАО «Могилевский завод «Строммашина». При этом удалось добиться обеспечения прочности сварных соединений при снижении энергопотребления сварочной контактной машины на 30...35 % за счет соответствующего снижения $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, на каждом из трех этапов кинетики процесса [13].

Второй вариант был апробирован при сварке кронштейнов лифтов на ОАО «Могилевский завод лифтового машиностроения». При этом удалось добиться обеспечения прочности сварных соединений при снижении энергопотребления сварочной контактной машины на 50 % за счет снижения $Q_{ЭЭ}$, вводимой в межэлектродную зону, на втором этапе кинетики процесса [14].

Дополнительно была исследована возможность снижения энергопотребления сварочной контактной машины за счет получения соединений в твердой фазе, а также оценена твердость сварных точек при использовании соответствующих циклограмм нагрева межэлектродной зоны [15, 16].

Для повышения достоверности и точности изучения вопросов повышения энергоэффективности КРС в состав экспериментальной установки был введен многофункциональный регистратор сварочных процессов РКДП 0401 (производитель – Российская Федерация) (регистратор), позволяющий осуществить тарировку системы САУ КРС и уточнить результаты ранее проведенных исследований (рис. 5) [17].

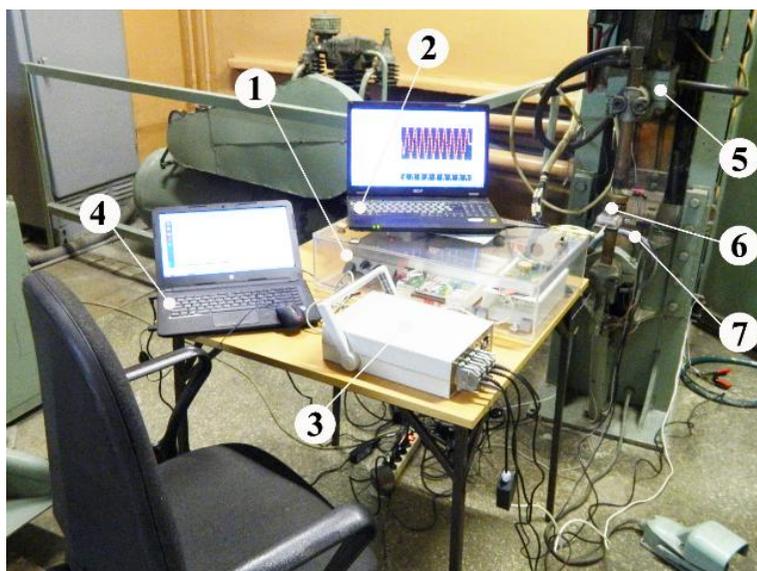


Рис. 5. Модернизированная экспериментальная установка: 1 – САУ КРС; 2 – ЭВМ к САУ КРС; 3 – регистратор; 4 – ЭВМ к регистратору; 5 – сварочная машина МТ–3201; 6 – свариваемые детали; 7 – пояс Роговского к регистратору

На примере КРС рассмотренных выше соединений (см. рис. 2) регистратором была установлена минимальная длительность протекания токов подогрева и сварки в двухступенчатом импульсе, а также определен минимум электрической энергии, которую можно ввести в межэлектродную зону системой САУ КРС при соответствующих токах.

Далее путем разбиения параметра τ_{CB} на равные временные интервалы были составлены и проанализированы размерные ряды ввода $Q_{ЭЭ}$ в межэлектродную зону. В результате было установлено, что ввиду особой динамики изменения параметра $R_{ЭЭ}$ процесс ввода $Q_{ЭЭ}$ в межэлектродную зону носит неравномерный характер: первоначально ввод энергии резко нарастает до максимального значения за период, а затем плавно снижается до момента выключения тока в связи с закрытием зазора между деталями.

Сопоставление размерных рядов ввода $Q_{ЭЭ}$ в межэлектродную зону показало, что режимы КРС, рекомендуемые в литературе, энергетически не эффективны, т. к. при максимальном токе (крутонарастающий импульс) рельеф деформируется за первые 3...4 периода сварки и ток вплоть до момента выключения протекает по увеличенной площади контакта «деталь–деталь» с малым сопротивлением и максимальным теплоотводом в основной металл и электроды.

При этом было доказано, что использование системы САУ КРС с двухступенчатым введением в межэлектродную зону минимально возможного количества электрической энергии (в 3,4 раза меньше расчетного) приводит к 28 % падению прочности соединений. Введение энергии в количестве 50 % и более от расчетного значения придает сварным соединениям прочность, соответствующую их разрушению по основному металлу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березиенко, В. П.** Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
2. **Катаев, Р. Ф.** Теория и технология контактной сварки : учеб. пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2015. – 144 с.
3. **Гилевич, В. А.** Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 151 с.
4. **Абабков, Н. В.** Технология и оборудование контактной сварки : учеб. пособие / Н. В. Абабков, М. В. Пимонов. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 258 с.
5. **Гуляев, А. И.** Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
6. **Смирнов, В. В.** Оборудование для контактной сварки / В. В. Смирнов – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 736 с.
7. **Гельман, А. С.** Технология контактной электросварки / А. С. Гельман. – М. : МАШГИЗ, 1952. – 322 с.
8. **Орлов, Б. Д.** Технология и оборудование контактной сварки : учебник для машиностр. вузов / Б. Д. Орлов. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
9. **Поляков, А. Ю.** Контактная рельефная сварка пакетных соединений с автоматическим регулированием параметров режима : дис. ... канд. техн. наук : защищена 13.02.15; утв. 09.06.15 / Поляков Андрей Юрьевич. – Могилев, 2015. – 204 с.
10. **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.
11. **Пат. РБ, МПК В 23 К 11/11.** Способ контактной точечной и/или рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булышко. – № 19977 (С1) ; заявл. 25.11.13 ; опубл. 30.04.16. – 4 с.
12. **Пат. РБ, МПК В 23 К 11/10.** Система автоматического управления процессом рельефной сварки / А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик, С. С. Кораткевич, А. О. Булышко. – № 10481 (U) ; заявл. 18.11.13; опубл. 30.12.14. – 5 с.
13. 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.
14. Разработка энергосберегающего технологического процесса контактной рельефной сварки кронштейна лифта по кольцевому рельефу / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3. – С. 51–62.
15. Об обеспечении прочности соединений, получаемых способом контактной рельефной сварки, без образования литого ядра / А. Ю. Поляков [и др.] // Вестн. Полоц. госуд. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 75–81.
16. **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.
17. **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.

