

---

DOI: 10.53078/20778481\_2021\_4\_88

УДК 621.791.763.2

*С. М. Фурманов, Д. И. Якубович, Д. Н. Юманов, Л. С. Малашенко, И. А. Наумовец*

**О ВЛИЯНИИ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ НА ШИРИНУ ЛИНИИ СПЛАВЛЕНИЯ Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

---

*S. M. Furmanov, D. I. Yakubovich, D. N. Yumanov, L. S. Malashenko, I. A. Naymovets*

**ON THE EFFECT OF HEAT INPUT ENERGY ON THE WIDTH OF FUSION LINE IN T-JOINTS MADE WITH PROGRAM-CONTROLLED PROJECTION WELDING**

---

**Аннотация**

Определены зависимости ширины линии сплавления, перемещения подвижного электрода и энергии тепловложения в зависимости от времени протекания сварочного тока. Проведены металлографические исследования, выявившие ферритно-перлитную структуру сварной точки с неравномерностью распределения феррита и перлита по сечению сварной точки. Отличие фазового состава подтверждено изменением микротвердости по сечению сварной точки. Выявлен оптимальный термомеханический цикл рельефной сварки Т-образных соединений с программным управлением мощностью тепловложения с точки зрения ширины линии сплавления, геометрических размеров сварного соединения в целом и среднего усилия при испытании на отрыв.

**Ключевые слова:**

контактная рельефная сварка, программное управление мощностью тепловложения, перемещение подвижного электрода, стабильность прочностных характеристик соединений, металлографические исследования, линия сплавления.

**Для цитирования:**

О влиянии энергии тепловложения на ширину линии сплавления Т-образных соединений при рельефной сварке с программным управлением / С. М. Фурманов, Д. И. Якубович, Д. Н. Юманов, Л. С. Малашенко, И. А. Наумовец // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 88–95.

**Abstract**

The relationships between the width of the fusion line, movable electrode displacement and heat input energy depending on the time of the welding current flow have been determined. Metallographic studies have been carried out, which revealed the ferrite-pearlite structure of a welded spot with uneven distribution of ferrite and pearlite over its cross-section. The difference in the phase composition is confirmed by a change in the microhardness over the cross-section of the welded spot. The optimal thermal deformation cycle has been found for the projection welding of T-joints with program-controlled heat input power, in respect to the width of the fusion line, the geometric dimensions of the welded joint as a whole and the average force exerted during the tear test.

**Keywords:**

resistance projection welding, programmed control of heat input power, movable electrode travel, stability of strength characteristics of joints, metallographic studies, fusion line.

**For citation:**

On the effect of heat input energy on the width of fusion line in T-joints made with program-controlled projection welding / S. M. Furmanov, D. I. Yakubovich, D. N. Yumanov, L. S. Malashenko, I. A. Naymovets // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 4 (73). – P. 88–95.

Основной задачей применения контактной рельефной сварки (КРС) на предприятиях машиностроения Республики Беларусь является обеспечение стабильно высоких прочностных характеристик сварных соединений с различными видами и формами рельефов при высоком уровне ресурсо- и энергосбережения по сравнению с механизированной сваркой в среде защитных газов.

Применение компьютерных систем программного управления (СПУ) процессом КРС позволяет изменять мощность тепловложения в зону сварки по заданной программе, обеспечивающей оптимальное протекание процесса [1–5].

СПУ обеспечивает плавное задание параметров режима, в связи с чем при сварке снижается вероятность появления выплесков расплавленного ме-

талла, дефектов сварных соединений, что оказывает решающее влияние на прочностные характеристики сварных соединений. СПУ позволяет генерировать различные циклограммы КРС, например, с плавным заданием нарастания мощности от подогрева  $P_{\text{ПОД}}$  к сварке  $P_{\text{СВ}}$  (рис. 1), что исключает динамические броски мощности в первичной цепи сварочного трансформатора при включении тока [6].

В эксперименте для оценки повышения прочностных характеристик соединений винтов М8 с потайной головкой (ГОСТ 17475–80) с пластиной толщиной 4 мм (сталь Ст3пс) производилась КРС образцов на экспериментальной установке с программным управлением мощностью тепловложения.

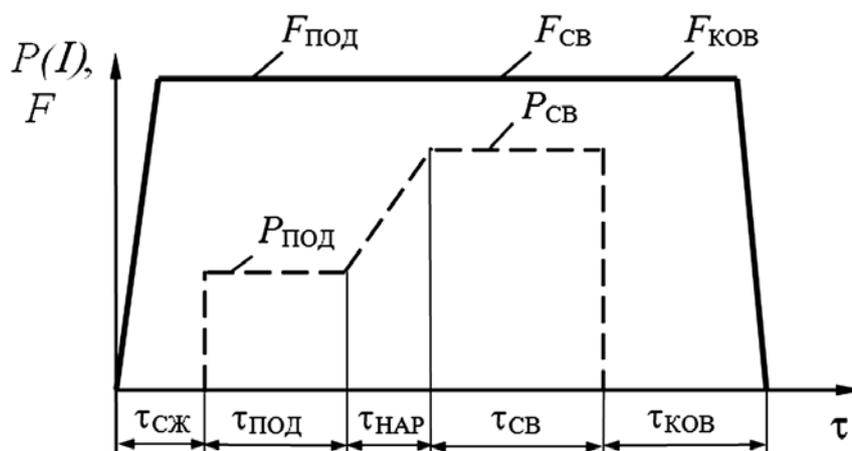


Рис. 1. Циклограмма контактной рельефной сварки при плавном нарастании мощности от подогрева  $P_{\text{ПОД}}$  к сварке  $P_{\text{СВ}}$  с постоянным усилием сжатия электродов при подогреве, сварке и проковке  $F_{\text{ПОД}} = F_{\text{СВ}} = F_{\text{КОВ}}$

Исследовалось влияние времени протекания сварочного тока  $\tau_{\text{СВ}}$  на энергию тепловложения  $Q_{\text{ЭЭ}}$  и величину перемещения подвижного электрода  $H_{\text{ЭЛ}}$  при задании параметров режима: время подогрева  $\tau_{\text{ПОД}} = 0,3$  с, ток подогрева  $I_{\text{ПОД}} = 7,5$  кА, время нарастания мощности от подогрева  $P_{\text{ПОД}}$  к сварке  $P_{\text{СВ}}$   $\tau_{\text{НАР}} = 0,2$  с, сварочный ток

$I_{\text{СВ}} = 18...19$  кА, время предварительного сжатия и проковки  $\tau_{\text{СЖ}} = \tau_{\text{КОВ}} = 0,5$  с, усилие сжатия электродов  $F_{\text{ПОД}} = F_{\text{СВ}} = F_{\text{КОВ}} = 7900$  Н. Исследования проводились на пяти сериях образцов. Для каждой серии сваривались по три сварных соединения. При сварке каждой последующей серии образцов увеличивалось время протекания сварочного то-

ка  $\tau_{\text{CB}}$ , которое задавалось равным 0; 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2 с.

Задачей металлографических исследований соединений, выполненных КРС, являлось определение параметров сварного соединения: размеров и формы зерен металла, различных дефектов его строения, а также установление зависимости изменения ширины линии сплавления от энергии тепловложения [7, 8].

Кристаллизация сварных точек при КРС происходит в условиях, которые отличаются от условий кристаллизации сварных швов, выполненных дуговыми способами сварки плавлением. Процессам кристаллизации сварной точки предшествует интенсивный нагрев металла, а затем интенсивное охлаждение расплавленного металла. Скорость охлаждения, как правило, исчисляется сотнями градусов в секунду [8]. Процессы кристаллизации сварной точки и процессы охлаждения сварного соединения в целом во многих случаях оказывают решающее влияние на их структуру и механические свойства. Важность изучения процессов охлаждения сварного соединения очевидна. При

КРС существенную роль на данные процессы играет количество энергии, вложенной в изделие. Поэтому изучение влияния энергии тепловложения на процессы структурообразования является актуальной задачей.

Для проведения металлографических исследований Т-образных сварных соединений винтов с пластиной использовался микроскоп Лабомет 1. Образцы для изготовления микрошлифов получали путем разрезания сварного соединения на две части вдоль оси симметрии на расстоянии 0,5...1,0 мм от неё, с дальнейшим использованием большей половины образца. Отрезка образцов проводилась механическим способом при обильной подаче смазочно-охлаждающей жидкости. Шлифовка и полировка проводилась по стандартной методике с последующим травлением образцов в 5-процентном растворе азотной кислоты со спиртом в течение 5 с. Микротвердость определялась на микротвердомере Виккерса при усилии 10 Н и времени выдержки 10 с. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты экспериментальных исследований КРС Т-образных соединений

Время протекания сварочного тока $\tau_{\text{CB}}$ , с	Ширина линии сплавления (диапазон) $H_{\text{ЛС}}$ , мм	Среднее значение $H_{\text{ЛС}}$ , мм	Перемещение электрода (диапазон) $H_{\text{ЭЛ}}$ , мм	Среднее значение $H_{\text{ЭЛ}}$ , мм	Среднее значение энергии тепловложения $Q_{\text{ЭЭ}}$ , Дж	Среднее значение усилия на отрыв $F_{\text{ОТР}}$ , кН
0	0...0,3	0,15	0,76...0,95	0,85	6890	11,03
0,05	0,5...1,6	1,05	0,83...1,45	1,18	8790	15,33
0,1	1,15...2,1	1,8	1,3...1,75	1,49	10486	16,23
0,15	1,5...2,4	1,95	1,55...1,85	1,72	11836	17,4
0,2	2,1...3,2	2,65	1,7...2,35	1,98	13050	19,45

При  $\tau_{\text{CB}} = 0$  с,  $Q_{\text{ЭЭ}} = 6890$  Дж (на стадии подогрева и нарастания мощ-

ности тепловложения от подогрева к сварке) образовавшаяся линия сплав-

ления не превышала 0,3 мм (рис. 2), в отдельных случаях полностью отсутствовала (рис. 3). Возникший непровар

говорит о недостаточном разогреве металла соединения.

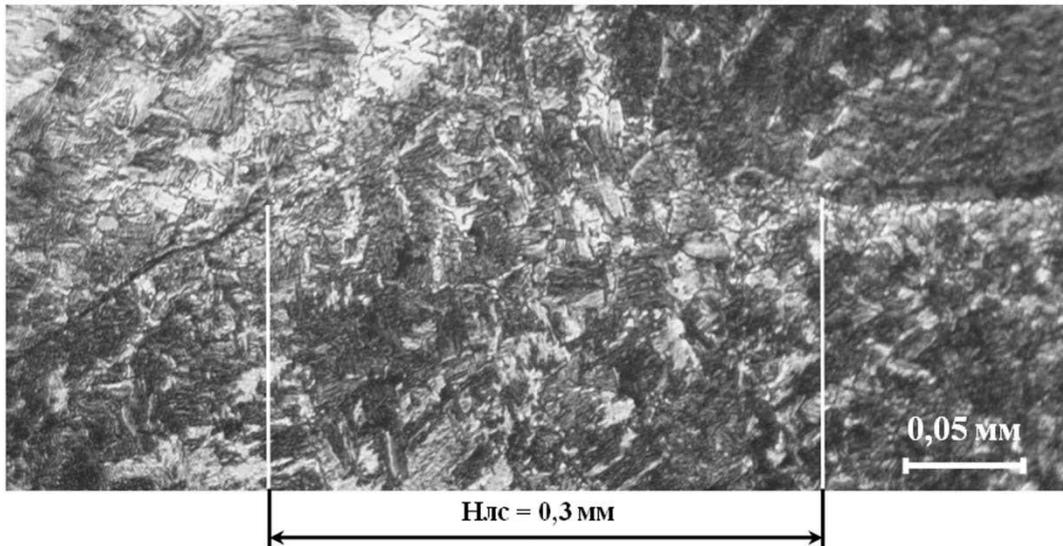


Рис. 2. Минимальная линия сплавления Т-образного сварного соединения при  $\tau_{св} = 0$  с, увеличение  $\times 640$

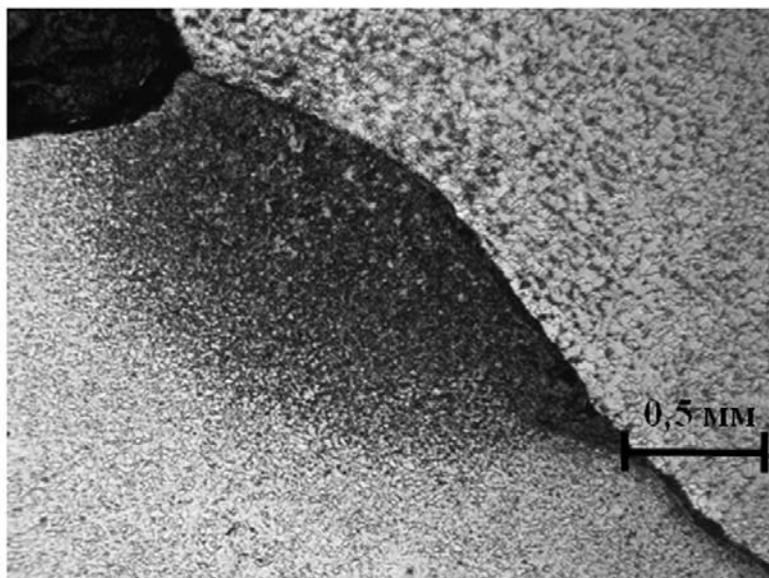


Рис. 3. Непровар Т-образного сварного соединения при  $\tau_{св} = 0$  с, увеличение  $\times 64$

Максимально достигнутая ширина линии сплавления  $H_{лс}$ , которая образовалась при максимальной энергии тепловложения в изделие  $Q_{ээ} = 13050$  Дж при  $\tau_{св} = 0,2$  с, составила 3,2 мм (см. табл. 1).

При задании энергии тепловложения в процессе КРС величина осевого перемещения подвижного электрода  $H_{эл}$  использовалась как критерий образования качественного соединения. Как показали эксперименты, средняя

величина перемещения  $H_{ЭЛ}$  имеет прямую взаимосвязь со средним значением энергии тепловложения  $Q_{ЭЭ}$  в зону соединения.

Графики зависимости ширины линии сплавления  $H_{ЛС}$ , перемещения по-

движного электрода  $H_{ЭЛ}$  и энергии тепловложения  $Q_{ЭЭ}$  в зависимости от времени протекания сварочного тока  $\tau_{СВ}$  представлены на рис. 4.

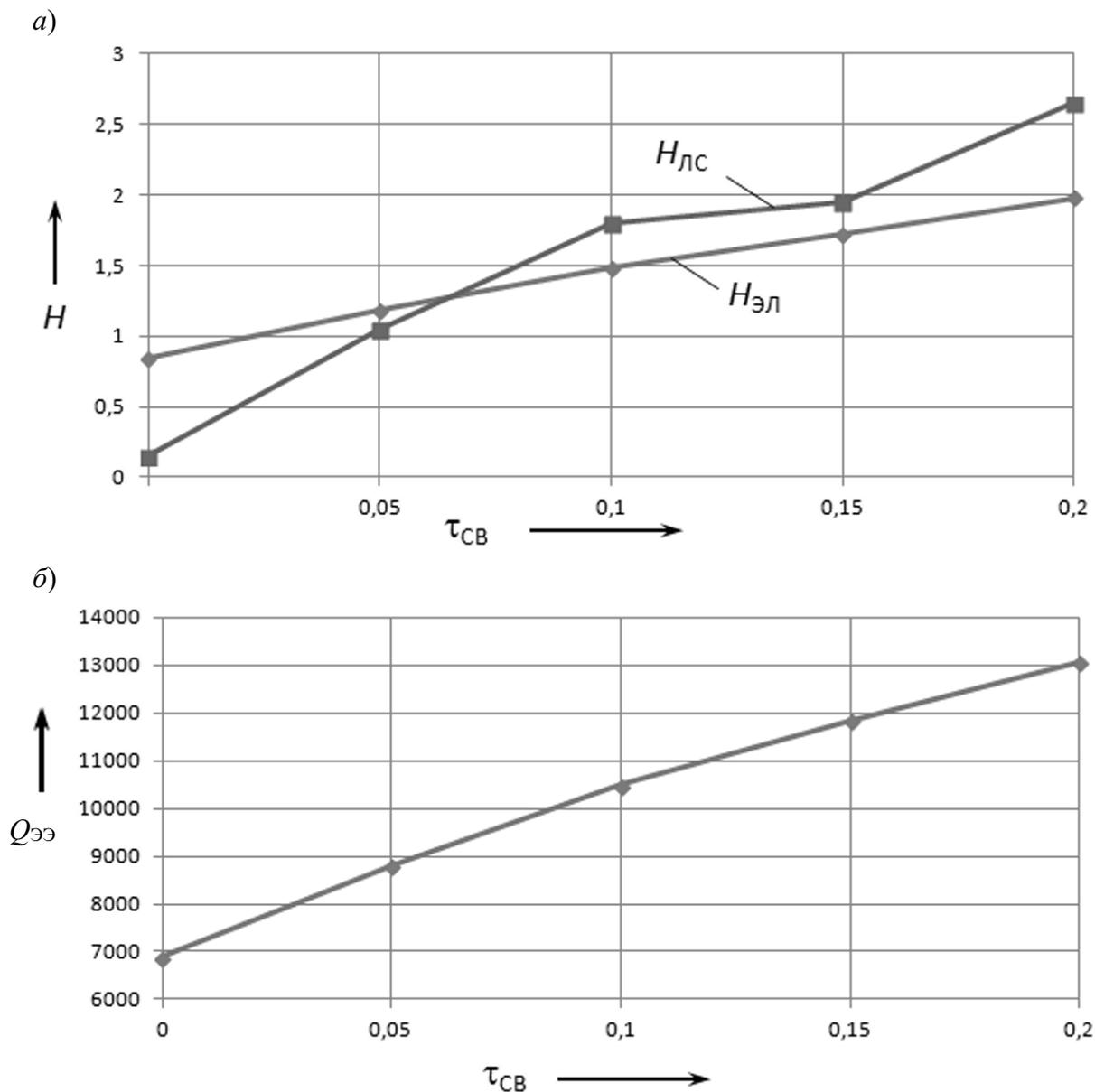


Рис. 4. Графики зависимостей ширины линии сплавления  $H_{ЛС}$ , перемещения подвижного электрода  $H_{ЭЛ}$  (а) и энергии тепловложения  $Q_{ЭЭ}$  (б) в зависимости от времени протекания сварочного тока  $\tau_{СВ}$

Исследования линии сплавления  $H_{ЛС}$  показали её рост в зависимости от увеличения мощности тепловложе-

ния, что является закономерным результатом. Более интенсивный разогрев приводит к нагреву большего количе-

ства металла выше температуры плавления  $T_{пл}$  и образования сварной точки большего объема. Установлено, что уже при  $\tau_{св} = 0,1$  с сварное Т-образное соединение образуется без видимых дефектов на всем протяжении  $H_{лс}$ . Размер зерен непосредственно на линии сплавления со стороны винта составляет менее 0,01 мм (рис. 5).

Структура основного металла, не подвергшегося термическому воздействию и сварной точки, соответствует ферритно-перлитной структуре. По се-

чению сварной точки обнаружена неравномерность распределения феррита и перлита. Со стороны винта имеется большее количество перлита, а со стороны пластины большее количество феррита. Отличие фазового состава подтверждается изменением микротвердости по сечению сварной точки. Со стороны винта микротвердость составила 200...240 HV с равномерным снижением значений у края сварной точки со стороны пластины до 180...190 HV (рис. 6).

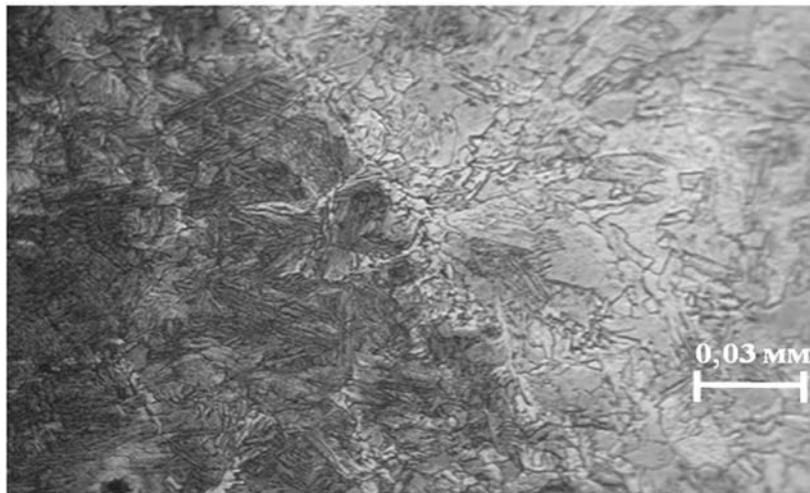


Рис. 5. Линия сплавления сварного соединения при времени  $\tau_{св} = 0,1$  с, увеличение  $\times 640$

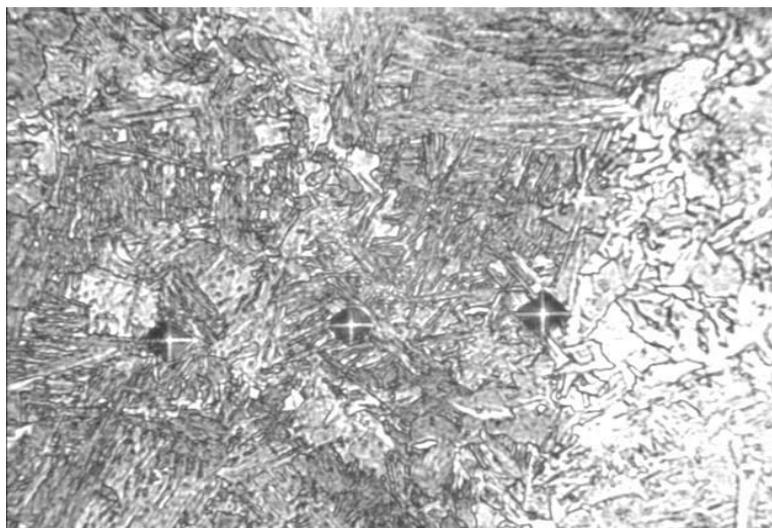


Рис. 6. Определение микротвердости у линии сплавления сварной точки с основным металлом изделия

Микротвердость основного металла изделия, не подвергнувшегося термическому воздействию, составила для пластины 165...175 HV, для винта 140...155 HV.

Для всех пяти серий образцов проводились испытания на отрыв в соответствии с ГОСТ 6996–66. Сварные соединения, выполненные рельефной сваркой, испытывали на отрыв статическим продавливанием.

В качестве критерия обеспечения требуемой прочности сварных соединений было выбрано необходимое значение усилия отрыва при испытании винта М8 на растяжение согласно ГОСТ 1759.4–87. Согласно этому документу сварное соединение должно обеспечивать усилие отрыва не менее 19,5 кН для класса прочности винтов 5,6.

Образцы 1, 2, 3 и 4 серии показали среднее усилие на отрыв 11,03; 15,33; 16,23 и 17,4 кН соответственно. Следовательно, режимы технологического процесса сварки данных соединений можно считать неподходящими для получения качественного сварного соединения. Образцы из серии 5 показали усилие на отрыв 19,45 кН, что соответствует требованиям ГОСТ 1759.4–87.

### Выводы

1. Определены зависимости ширины линии сплавления  $H_{лс}$ , перемещения подвижного электрода  $H_{эл}$  и энергии тепловложения  $Q_{ээ}$  в зависимости от времени протекания максимального сварочного тока  $\tau_{св}$  при задании параметров

режима: время подогрева  $\tau_{под} = 0,3$  с, ток подогрева  $I_{под} = 7,5$  кА, время нарастания мощности от подогрева к сварке  $\tau_{нар} = 0,2$  с, сварочный ток  $I_{св} = 18...19$  кА, время предварительного сжатия и проковки  $\tau_{сж} = \tau_{ков} = 0,5$  с, усилие сжатия электродов при подогреве, сварке и проковке  $F_{под} = F_{св} = F_{ков} = 7900$  Н.

2. Учитывая термомеханический цикл сварки Т-образных сварных соединений, выполненных контактной рельефной сваркой с программным управлением мощностью тепловложения, оптимальным с точки зрения ширины линии сплавления 2,1...3,2 мм, геометрических размеров сварного соединения в целом и среднего усилия на отрыв  $F_{отр} = 19,45$  кН является режим с временем протекания максимального сварочного тока  $\tau_{св} = 0,2$  с.

3. Металлографические исследования показали, что структура сварной точки соответствует ферритно-перлитной, при этом по сечению сварной точки обнаружена неравномерность распределения феррита и перлита: со стороны винта имеется большее количество перлита, а со стороны пластины – большее количество феррита. Отличие фазового состава подтверждается изменением микротвердости по сечению сварной точки: со стороны винта микротвердость составила 200...240 HV с равномерным снижением значений у края сварной точки со стороны пластины до 180...190 HV.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов, А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышения стабильности качества / А. С. Климов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 216 с.
2. Фурманов, С. М. Пути совершенствования термомеханических циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 274 с.
3. Аппаратная реализация корректирующей системы регулирования мощности тепловложения при контактной рельефной сварке / С. М. Фурманов [и др.] // Сварка и диагностика, 2018. – № 5. – С. 35–40.
4. Компьютерное управление процессом контактной сварки с помощью среды графического программирования LabVIEW / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 54–62.

5. О влиянии параметров режима контактной рельефной сварки с программным управлением мощностью тепловложения на стабильность прочностных показателей соединений / Д. Н. Юманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3. – С. 118–129.

6. Денисенко, Н. А. Определение по осциллограммам эффективных значений токов и коэффициентов мощности машин для контактной сварки / Н. А. Денисенко, И. А. Курило // Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 59–62.

7. Россошинский, А. А. Металлография сварных швов / А. А. Россошинский. – Москва: Машгиз, 1961. – 207 с.

8. Анисович, А. Г. Практика металлографического исследования материалов: монография / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 221 с.

*Статья сдана в редакцию 29 октября 2021 года*

**Сергей Михайлович Фурманов**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-295-41-67-99. E-mail: furm@mail.ru.

**Дмитрий Николаевич Юманов**, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-339-12-90-00. E-mail: oitsp.dmitriy.y@gmail.com.

**Дмитрий Иванович Якубович**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-296-81-14-35. E-mail: d.i.yakubovich@mail.ru.

**Игорь Андреевич Наумовец**, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-336-72-06-80.

**Леонид Сергеевич Малашенко**, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-292-95-58-93.

**Sergei Mikhailovich Furmanov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University. Tel.: +375-295-41-67-99. E-mail: furm@mail.ru.

**Dmitry Nikolayevich Yumanov**, assistant lecturer, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-339-12-90-00. E-mail: oitsp.dmitriy.y@gmail.com.

**Dmitry Ivanovich Yakubovich**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University. Tel.: +375-296-81-14-35. E-mail: d.i.yakubovich@mail.ru.

**Igor Andreyevich Naymovets**, MSc student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-336-72-06-80.

**Leonid Sergeevich Malashenko**, student, Belarussian-Russian University. Tel.: +375-292-95-58-93