

4. **Pashkevich, V. M.** Povyshenie tochnosti proektirovaniya stanochnykh prispособlenij na osnove ustraneniya zatsiklivaniya semanticheskikh setej / V. M. Pashkevich, M. N. Mironova // Sb. nauch. tr. Mezhdunar. baltiyskoj assotsiatsii mashinostroitelej. – Kaliningrad, 2009. – S. 104–110.

5. **Pashkevich, V. M.** Optimizatsiya rezhimov rezaniya na osnove ispol'zovaniya semanticheskikh setej / V. M. Pashkevich, M. N. Mironova // Vestn. Belarus. national. tekhn. un-ta. – 2011. – № 3. – S. 9–12.

Статья сдана в редакцию 5 сентября 2011 года

Виктор Михайлович Пашкевич, д-р техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: pvm@bk.ru.

Марина Николаевна Миронова, ассистент, Белорусско-Российский университет. E-mail: MarinaMN16@mail.ru.

Viktor Mikhailovich Pashkevich, DSc, Associate Professor, Belarusian-Russian University. E-mail: pvm@bk.ru.

Marina Nikolayevna Mironova, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail : MarinaMN16@mail.ru.

УДК 621.791.763.2

А. Ю. Поляков, С. М. Фурманов, Т. И. Бендик

О ФОРМИРОВАНИИ СТУПЕНЧАТЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ

UDC 621.791.763.2

A. Y. Polyakov, S. M. Furmanov, T. I. Bendik

ON THE FORMATION OF STEP CONNECTIONS IN RESISTANCE PROJECTION WELDING

Аннотация

Исследована кинетика формирования ступенчатого рельефного соединения трех пластин, определены основные этапы образования литой зоны, выявлена отличительная особенность образования ступенчатого рельефного соединения по сравнению с соединением двух деталей, экспериментально определены оптимальные параметры режима сварки рельефного соединения трех пластин.

Ключевые слова:

ступенчатое соединение, рельефная сварка, параметры режима, кинетика формирования соединения, перемещение и скорость перемещения подвижного электрода, термоупругопластическое деформирование.

Abstract

Kinetics of the formation of step projection connection of three plates is investigated, basic stages of the formation of cast zone are determined, a distinctive feature of the formation of step projection connection compared to the connection of two parts is revealed, optimum welding parameters of projection connection of three plates are experimentally determined.

Key words:

step connection, projection welding, parameters of welding conditions, kinetics of connection formation, travel and travel speed of movable electrode, thermoelastoplastic deformation.

К ступенчатым сварным соединениям относят соединения трех и более деталей, полученные за один цикл сварки, при котором за счет последовательно протекающего сварочного тока образуется общая литая зона. Данные соединения широко применяются при производстве пакетов из плоских листов черных металлов для магнитопроводов электрических машин, пакетов цветных листов, при изготовлении конструкций и замочно-скобяных изделий [1].

В настоящее время ступенчатые соединения получают контактной точечной сваркой. При этом невозможно избежать шунтирования сварочного то-

ка, за счет чего увеличивается расход электроэнергии и снижается производительность процесса. По сравнению с точечной рельефная сварка позволяет уже на начальной стадии процесса обеспечивать значительно большую прочность соединения. При этом производительность процесса сварки по сравнению с точечной можно увеличить в несколько раз [2].

Главной проблемой при сварке соединений данного типа является резкое снижение стабильности протекания процесса сварки с увеличением количества деталей [3]. При рельефной сварке ступенчатых соединений изменение па-

раметров режима, а также функции физических величин, например, таких как $r_{ЭЭ} = f(U_{ЭЭ})$ ($r_{ЭЭ}$ – сопротивление межэлектродного промежутка; $U_{ЭЭ}$ – напряжение межэлектродного промежутка); $r_{ЭЭ} = f(\tau)$ (τ – время протекания сварочного тока) и др., значительно отличаются от зависимостей, установленных для рельефной и точечной сварки двух деталей (рис. 1) [4].

Исследование кинетики формирования ступенчатого рельефного соединения производилось с помощью программного продукта MSC.MARC. Разработанная математическая модель термоупругопластического деформирования металла зоны ступенчатого соединения при сварке учитывает особенно-

сти нагрева при прохождении электрического тока, характер неизотермического упругопластического деформирования, зависимости теплофизических и механических свойств материалов от температуры, скрытую теплоту плавления. Модель отличается использованием конечно-элементного пошагово-совмещенного анализа электрических, температурных и деформационных полей с учетом изменения электрических и тепловых сопротивлений контактов, а также возможностью обеспечения сходимости вычислительного процесса при значительных пластических деформациях металла рельефа (рис. 2) [5–7].

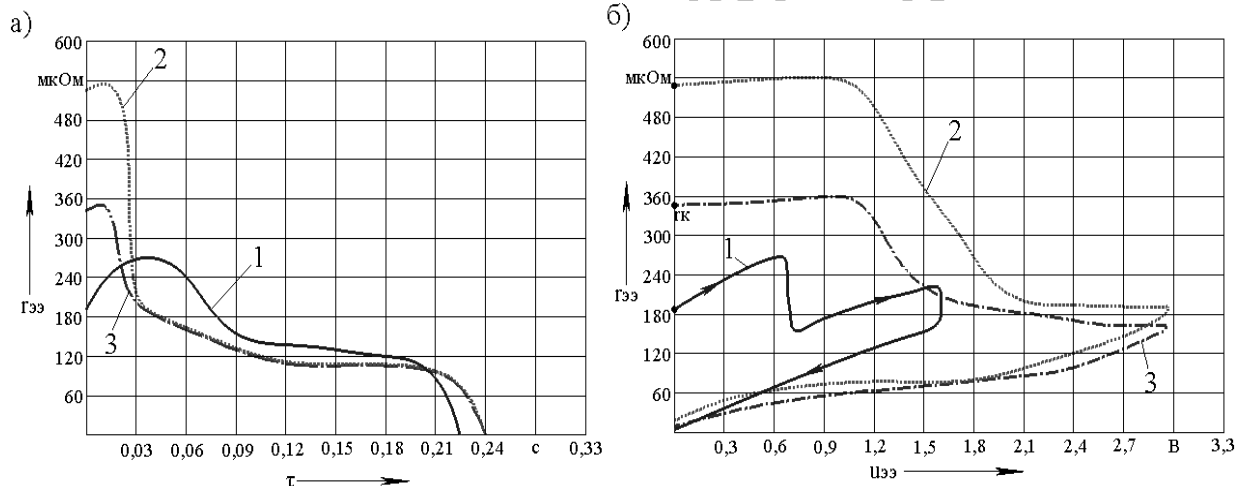


Рис. 1. Различия в зависимостях некоторых физических величин при рельефной сварке двух деталей и сварке ступенчатого соединения (пакеты 2 + 2 и 2 + 2 + 2 мм): а – зависимость $r_{ЭЭ} = f(\tau)$; б – зависимость $r_{ЭЭ} = f(U_{ЭЭ})$; кривая 1 – для соединения из двух деталей; кривая 2 – для соединения из трех деталей при сварочном усилии 8 кН; кривая 3 – для соединения из трех деталей при сварочном усилии 12 кН; гк – сопротивление холодного контакта межэлектродной зоны

Предложенная математическая модель обеспечивает решение следующих задач:

- исследование особенностей образования сварного соединения с возможностью произвольной корректировки основных параметров режима сварки;
- оценка термодеоформационных процессов, протекающих при рельефной сварке ступенчатых соединений различной геометрии;

- выбор и анализ характеристик сварочного оборудования (параметров привода сжатия контактной машины, размеров электродов и т. д.);

- учет характера изменения сопротивления межэлектродного промежутка;

- учет влияния формы импульса сварочного тока при фазовом регулировании на характер тепловыделения в зоне сварки.

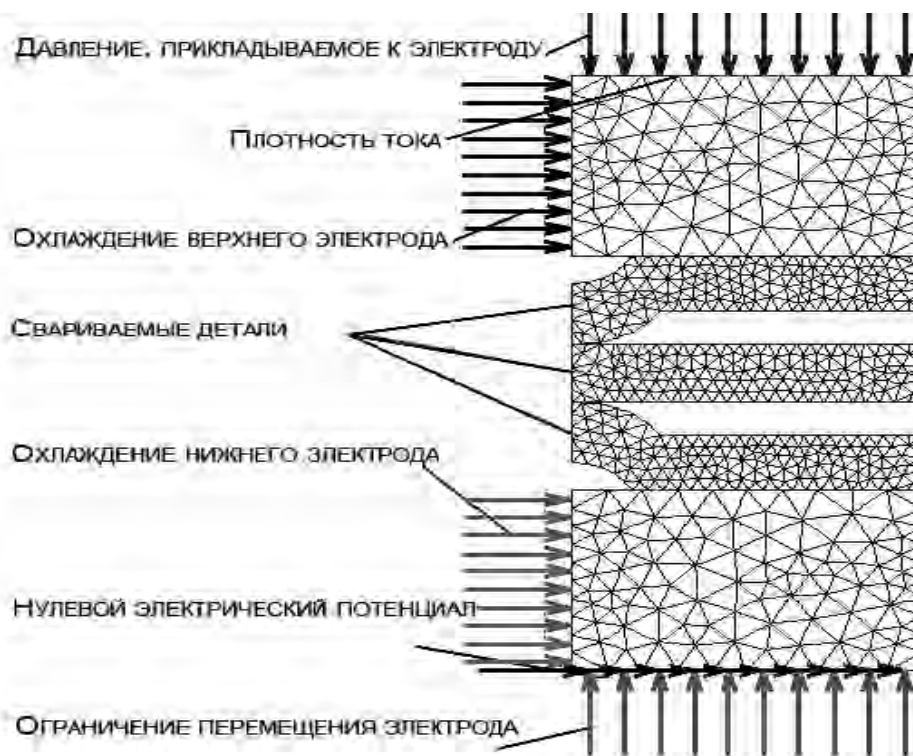


Рис. 2. Конечно-элементная модель теплового расчёта при контактной рельефной сварке ступенчатого соединения трех деталей в программной среде MSC.MARC 2005

При изучении кинетики формирования ступенчатых соединений трех деталей в качестве обобщающих параметров, по которым можно оценивать процессы осадки рельефов, снижения сопротивления межэлектродного промежутка, появления и роста зоны расплавления, использовались зависимости перемещения и скорости перемещения подвижного электрода от времени сварки. На рис. 3 представлены кривые данных зависимостей.

Анализ характера перемещения, скорости перемещения электрода и металлографические исследования соединений показали, что формирование рельефных ступенчатых соединений трех пластин состоит из четырех этапов. Кинетика формирования указанных соединений представлена на рис. 4.

Первый этап начинается с предварительного сжатия деталей и смятия рельефов. Между деталями образуется контакт. Предварительная деформация рельефов способствует стабилизации

электрического сопротивления контактов межэлектродной зоны и является необходимым условием получения качественных сварных соединений. Верхний электрод перемещается при этом на 0,05...0,1 мм (рис. 5).

На втором этапе, который начинается с момента включения сварочного тока, наблюдается плавное увеличение перемещения подвижного электрода до 0,3...0,4 мм. При прохождении первых импульсов сварочного тока металл зоны сварного соединения нагревается до температуры разупрочнения $T > 800$ К, что сопровождается ростом контактных площадок. Интенсивная пластическая деформация металла средней детали и рельефов обеспечивает эффективное разрушение и удаление оксидных пленок из зоны сварки, ускоряет активацию контактных поверхностей. Это является обязательным условием получения прочных сварных соединений в твердой фазе [6, 7]. На данном этапе наблюда-

ются появление и рост зон расплавления (рис. 6).

На третьем этапе резко увеличивается скорость перемещения подвиж-

ного электрода с 1...2 до 35...65 мм/с, что объясняется интенсивной пластической деформацией металла зоны сварки.

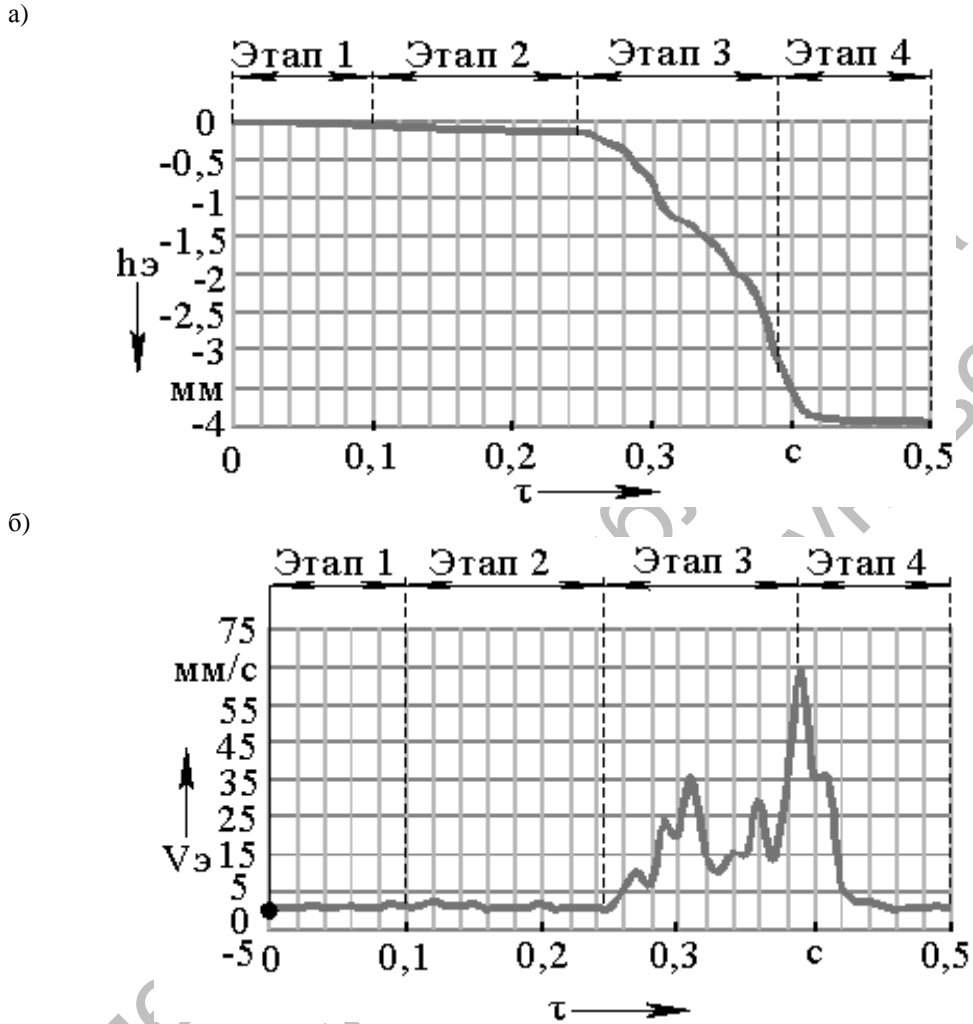


Рис. 3. Кривые перемещения (а) и скорости перемещения (б) подвижного электрода

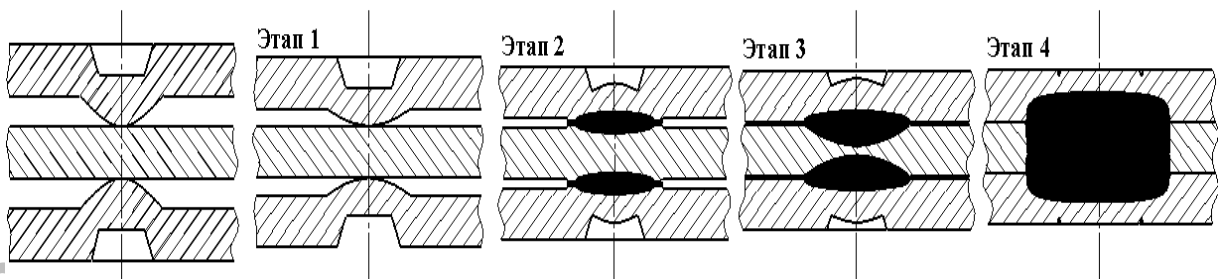


Рис. 4. Кинетика образования ступенчатого рельефного соединения

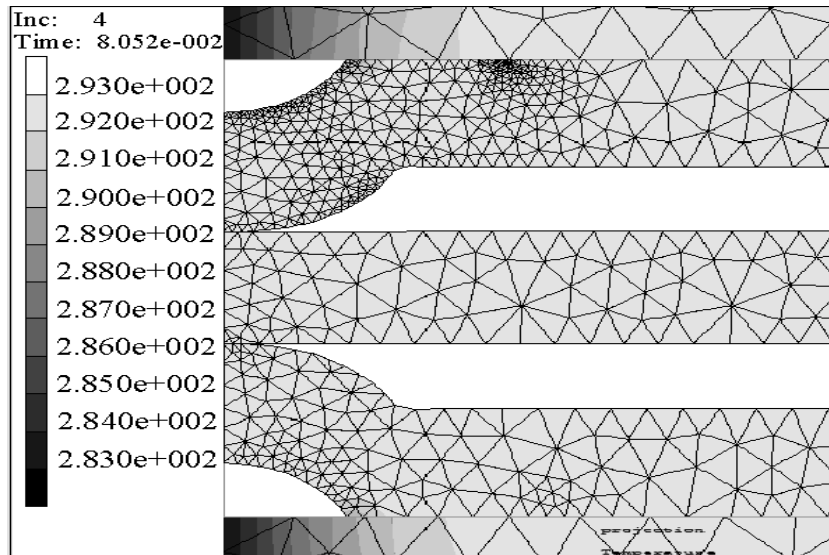


Рис. 5. Этап предварительного сжатия деталей

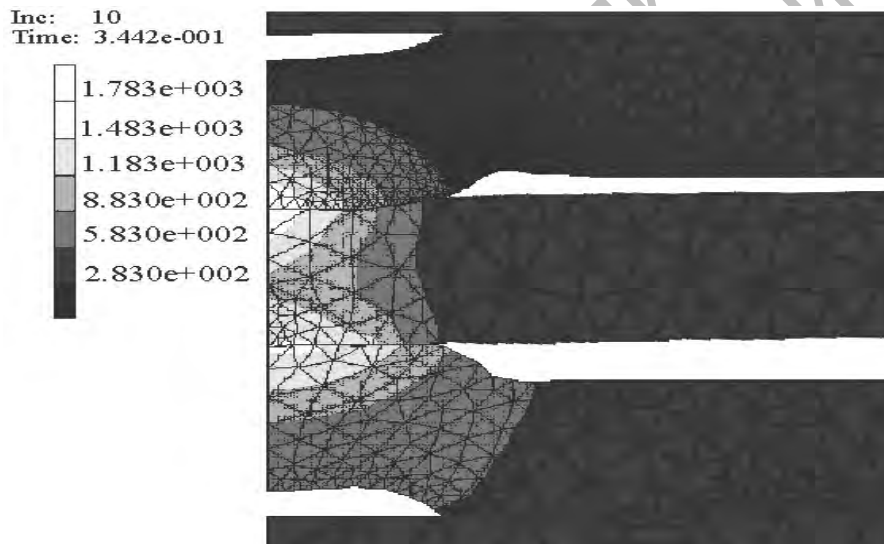


Рис. 6. Распределение температурного поля в момент включения сварочного тока (температура в кельвинах)

Процесс смятия рельефов сопровождается ростом размера контактных площадок. Перемещение электрода достигает значения в 3...3,2 мм. Начало данного этапа можно условно определить на основании осциллограмм перемещения и средней скорости подвижного электрода в процессе сварки. Окончанием этапа являются полная осадка рельефов на всю их высоту и касание поверхностей средней детали с поверхностями наружных деталей

(рис. 7). При этом скорость перемещения электрода снижается практически до нуля (см. рис. 3).

Четвертый этап начинается с момента выключения сварочного тока. При нормальном ходе процесса сварки в начале данного этапа должно быть уже сформировано расплавленное ядро требуемых размеров. Для получения качественных сварных соединений необходимо, чтобы длительность указанного этапа была достаточной для снижения и

релаксации в околошовной зоне остаточных напряжений. Перемещение электрода плавно достигает своего мак-

симального значения ($h_{\Sigma} = 4$ мм) и далее не изменяется (см. рис. 3, а).

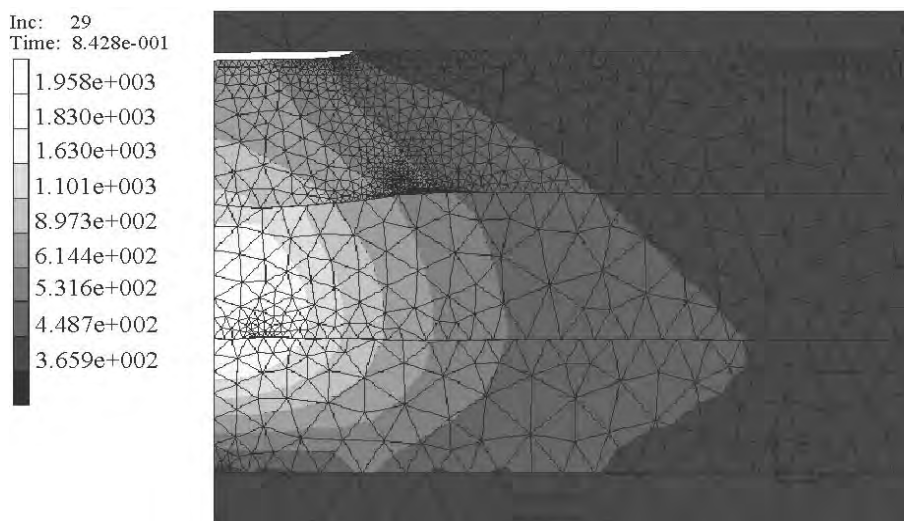


Рис. 7. Распределение температурного поля в момент выключения сварочного тока (температура в кельвинах)

Металлографические исследования сварных соединений позволили выявить отличительную особенность формирования ступенчатого соединения по сравнению с соединением двух деталей – для трех листов формируется одно общее литое ядро, т. е. в процессе формирования ядра две изначально образовавшиеся расплавленные зоны постепенно к моменту выключения тока объединяются в одну.

Установлено, что при сварке деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной 2 мм для получения соединения диаметром 7 и высотой 2,5 мм время формирования литого ядра составляет 0,28 с. Дальнейшее увеличение времени нецелесообразно, так как оно приводит к чрезмерному росту литого ядра и появлению усадочных раковин.

Анализ зависимостей параметров режима показал, что увеличение усилия сжатия электродов при постоянстве остальных параметров приводит к росту сварочного тока до порогового значения, соответствующего оптимальному

значению усилия, при котором фактическая площадь свариваемых контактов достигает максимального значения (рис. 8).

Проведенные экспериментальные исследования рельефной сварки трех пластин с тремя выштампованными рельефами на двух наружных пластинах позволили определить оптимальные параметры режима сварки: сварочный ток $I_{СВ} = 21...22$ кА, усилие сжатия электродов $F_{СВ} = 10...11$ кН; время протекания сварочного тока $\tau_{СВ} = 0,24...0,28$ с.

Выводы

1. Установлено, что при рельефной сварке ступенчатых соединений в качестве обобщающих параметров, характеризующих процессы осадки рельефов, снижения сопротивления межэлектродного промежутка, появления и роста зоны расплавления, можно использовать зависимости перемещения и скорости подвижного электрода от времени протекания сварочного тока.

2. Показано, что при формировании ступенчатого соединения холодные сопротивления контактов на межэлектродном участке зависят от усилия сжатия и в 1,5...2 раза выше, чем сопротивления при рельефной сварке двух деталей.

3. На основании исследований кинетики формирования рельефного ступенчатого соединения трех пластин определены четыре этапа его образования. Показано, что в процессе формирования

соединения две изначально образовавшиеся зоны постепенно к моменту выключения тока объединяются в одну.

4. Определены оптимальные параметры режима рельефной сварки ступенчатого соединения трех пластин (2 + 2 + 2 мм): сварочный ток $I_{СВ} = 21...22$ кА; усилие сжатия электродов $F_{СВ} = 10...11$ кН; время протекания сварочного тока $\tau_{СВ} = 0,24...0,28$ с.

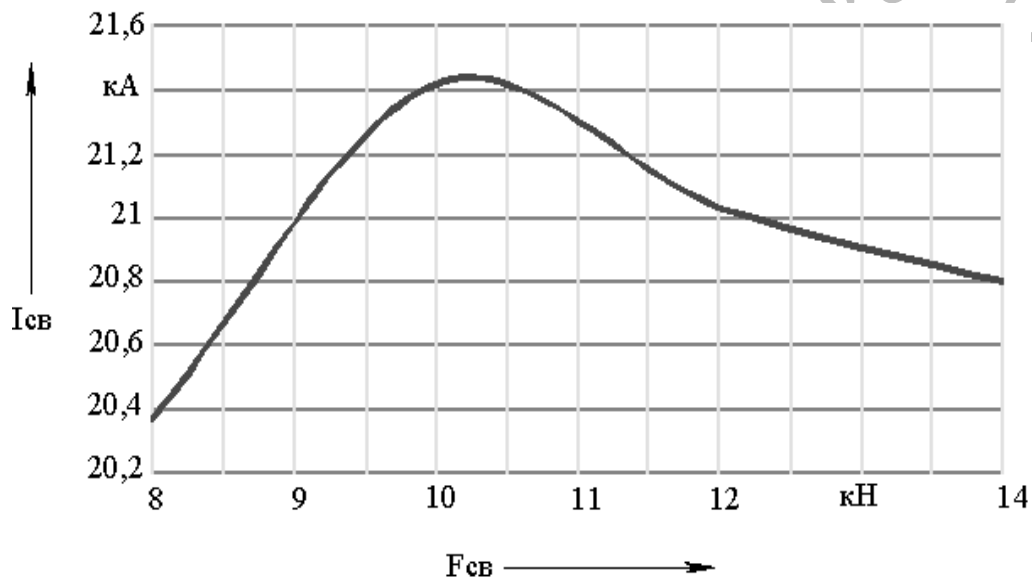


Рис. 8. Зависимость величины тока от усилия сжатия электродов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липа, М. Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. – Киев : Техника, 1971. – 324 с.
2. Гилевич, В. А. Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. – Л. : Машиностроение, 1976. – 151 с.
3. Кочергин, К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
4. Березиенко, В. П. Технология сварки давлением / В. П. Березиенко, С. Ф. Мельников, С. М. Фурманов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
5. Электротермодеформационный расчет процессов контактной точечной и рельефной сварки / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2008. – № 8. – С. 77–85.
6. О кинетике образования сварного соединения при Т-образной рельефной сварке «острой гранью» / В. П. Березиенко [и др.] // Сварка и родственные технологии : респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск, 2008. – № 10. – С. 85–90.
7. Выбор режимов контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В. П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 21–26.

LIST OF LITERATURE

1. **Lipa, M.** Resistance projection welding / M. Lipa, Y. Golasek. – Kiev : Tekhnika, 1971. – 324 p.
2. **Gillevich, V. A.** Technology and equipment of projection welding / V. A. Gillevich. – L. : Mashinostroenie, 1976. – 151 p.
3. **Kochergin, K. A.** Resistance welding / K. A. Kochergin. – L. : Mashinostroenie, 1987. – 240 p.
4. **Berezienko, V. P.** Technology of pressure welding / V. P. Berezienko, S. F. Melnikov, S. M. Furmanov. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2009. – 256 p.
5. Electrothermodeformational calculation of resistance spot welding and projection welding processes / V. P. Berezienko [et al.] // Her. of the Polotsk State Un-ty. – 2008. – № 8. – P. 77–85.
6. On kinetics of welding joint formation in T-shaped projection welding by «sharp edge» / V. P. Berezienko [et al.] // Welding and related technologies : rep. inter-departmental collection of scientific papers. – Minsk, 2008. – № 10. – P. 85–90.
7. Selection of conditions of resistance spot welding and projection welding on the basis of mathematical models of the processes / V. P. Berezienko [et al.] // Her. of the Polotsk State Un-ty. – 2009. – № 2. – P. 21–26.

LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Lipa, M.** Kontaktnaya rel'efnaya svarka / M. Lipa, Y. Golasek. – Kiev : Tekhnika, 1971. – 324 s.
2. **Gillevich, V. A.** Tekhnologiya i oborudovanie rel'efnoj svarki / V. A. Gillevich. – L. : Mashinostroenie, 1976. – 151 s.
3. **Kochergin, K. A.** Kontaktnaya svarka / K. A. Kochergin. – L. : Mashinostroenie, 1987. – 240 s.
4. **Berezienko, V. P.** Tekhnologiya svarki davleniem / V. P. Berezienko, S. F. Melnikov, S. M. Furmanov. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2009. – 256 s.
5. Elektrothermodeformatsionnyj raschet protsessov kontaktnoj tochechnoj i rel'efnoj svarki / V. P. Berezienko [i dr.] // Vestn. Polotsk Gos. Un-ta. – 2008. – № 8. – S. 77–85.
6. O kinetike obrazovaniya svarnogo soedineniya pri T-obraznoj rel'efnoj svarke «ostroj gran'yu» / V. P. Berezienko [i dr.] // Svarka i rodstvennye tekhnologii : resp. mezhvedomstv. sb. nauchn. tr. – Minsk, 2008. – № 10. – S. 85–90.
7. Vybór rezhimov kontaktnoj tochechnoj i rel'efnoj svarki na osnove matematicheskikh modelej protsessov / V. P. Berezienko [i dr.] // Vestn. Polotsk Gos. Un-ta. – 2009. – № 2. – S. 21–26.

Статья сдана в редакцию 13 июля 2011 года

Андрей Юрьевич Поляков, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Сергей Михайлович Фурманов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: furm@mail.ru.

Татьяна Ивановна Бендик, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: benedik82@mail.ru.

Andrey Yuryevich Polyakov, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: mortis2008@mail.ru.

Sergey Mikhailovich Furmanov, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. E-mail: furm@mail.ru.

Tatiana Ivanovna Bendik, PhD, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: benedik82@mail.ru.