



СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МАШИН ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Академик НАН Украины **В. К. ЛЕБЕДЕВ**, **А. А. ПИСЬМЕННЫЙ**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы системы питания машин для контактной сварки: однофазные промышленной частоты и трехфазные с преобразователями частоты и числа фаз. Проведено качественное сравнение семи систем питания по их технологическим свойствам, влиянию возмущений на качество соединений, износу электродов, а также энергетическим показателям.

Ключевые слова: контактная сварка, системы питания, преобразователи частоты и числа фаз, машины постоянного тока, энергетические показатели

Контактная сварка — один из наиболее распространенных способов соединения металлов, применяемых в автомобиле- и приборостроении, производстве многообразной бытовой техники, средств управления, измерения и связи, металлических сеток и каркасов, строительстве и ремонте железнодорожных путей, а также во многих других областях. Посредством контактной сварки изготавливают изделия из сталей и сплавов на основе цветных металлов. Толщина деталей, подлежащих точечной сварке, изменяется от нескольких микрон до нескольких миллиметров, а при стыковой сварке поперечное сечение в месте соединения колеблется от нескольких долей до сотни тысяч квадратных миллиметров. Поэтому оборудование для контактной сварки очень разнообразно как по конструктивному исполнению, так и по мощности, габаритным размерам.

Ниже рассматриваются особенности систем питания машин для контактной сварки, определяющие их энергетические показатели и в значительной мере технологические свойства.

При выборе системы питания нужно установить, можно ли воспроизвести оптимальный режим сварки, используя ту или иную систему и какая из них позволит сделать это проще и надежнее. Что касается таких импульсных процессов, как контактная точечная, рельефная и шовная сварка, то здесь следует ориентироваться на минимально необходимое время процесса и возможность воспроизведения наиболее подходящего токового цикла. Но и этого недостаточно — нужно проанализировать еще возможное влияние возникающих в ходе сварки возмущений на качество соединений.

При сварке сопротивлением деталей из металлических листов основными возмущениями являются следующие:

износ электродов, приводящий к увеличению поверхности контакта электрод-деталь;

электрическое шунтирование сварочного контакта ранее сваренными точками или случайными контактами;

механическое шунтирование ранее сваренными точками, затрудняющее образование сварочного контакта. Аналогичный эффект может давать и неточная сборка;

колебания напряжения сети;

загрязнение поверхности изделий или некачественная подготовка их к сварке;

загрязнение поверхности электродов.

Влияние ряда возмущений на качество соединений в значительной мере связано с внешней характеристикой (рис. 1), форма которой зависит не только от сопротивления короткого замыкания машины, но и от системы питания, прежде всего, частоты сварочного тока. От особенностей системы питания в некоторой мере зависят и условия на границе электрод-деталь, определяющие эксплуатационную стойкость электродов.

Наиболее вероятное возмущение — износ электродов, который вызывает снижение сопротивления сварочного контакта, а также возрастание тока — тем большее, чем более пологой является его внешняя характеристика. В результате вероятность появления непровара становится меньшей при использовании машин с более жесткими внешними характеристиками. На практике зачастую выбирают режимы сварки с большим запасом, чтобы дефектов подобного рода не было. Однако при этом расходуется лишняя энергия.

На рис. 2 показаны зависимости высоты ядра сварной точки H от сопротивления короткого замыкания машины $R_{к.з.}$. Напряжение выбирается таким, как при сварке еще не изношенным электродом, и остается затем неизменным. Высота H_1 относится к новому электроду, а H_2 — к электроду, у которого диаметр контактной поверхности увеличен вследствие износа на 20 %. Как видно,

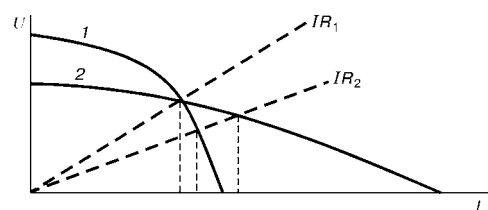


Рис. 1. Внешние характеристики машин контактной сварки и падение напряжения на сварочном контакте ($R_2 < R_1$): 1, 2 — жесткая и пологопадающая характеристики (U — напряжение; I — ток)

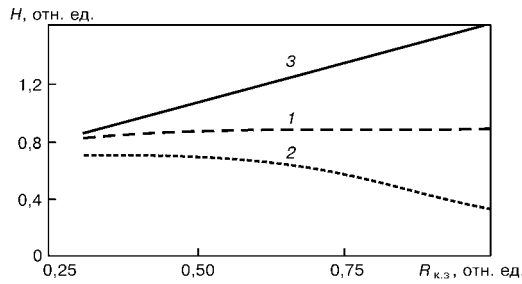


Рис. 2. Зависимость высоты H , ядра точки при новом электроде и H_2 при изношенном электроде от сопротивления короткого замыкания $R_{к.з.}$: 1 — H_1 ; 2 — H_2 ; 3 — U

снижение сопротивления короткого замыкания благоприятно отражается на стабильности размеров литого ядра сварной точки. При этом нет необходимости во вложении дополнительной энергии для гарантии минимально необходимой высоты ядра при изношенном электроде. То же касается и шунтирования: форма внешней характеристики и при этом возмущении влияет на формирование сварного соединения.

Несомненно, износ электрода зависит от температуры контакта электрод–деталь в начале процесса сварки, когда этот контакт еще не сформировался и микроконтакты не деформировались. Здесь также проявляется влияние сопротивления короткого замыкания машины: чем оно ниже, тем меньше вероятность перегрева микроконтактов со всеми отрицательными последствиями.

На рис. 3 показано приблизительное распределение температуры в контакте медного электрода со стальным изделием, поверхностный слой которого отличается повышенным сопротивлением вследствие наличия пленок и шероховатости поверхности. Распределение температуры соответствует моменту после протекания через сварочный контакт импульсов тока разной продолжительности, но при одинаковой энергии. Чем «мягче» импульс, тем меньше температура на границе раздела материалов. В связи с этим на перегрев этой границы должны оказывать влияние пульсации сварочного тока. Глубокие пульсации могут вызвать расплавление микрообъемов с образованием сплавов, отличающихся повышенным электрическим сопротивлением и прогрессирующим налипанием этого сплава на поверхность электрода. Такое явление зафиксировано при сварке сталей с антикоррозионными покрытиями, в частности с цинковым. Если температура плавления электрода выше температуры плавления металла изделия, то возможен переход электродного металла на поверхность сварного соединения. Для случая, когда возможен перегрев контакта электрод–деталь, переменный ток промышленной частоты неблагоприятен.

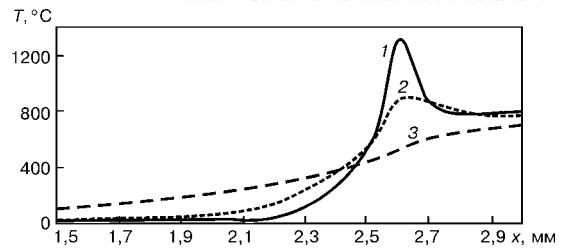


Рис. 3. Распределение температуры в контакте электрод–деталь в зависимости от продолжительности импульса тока при неизменной энергии: 1 — 0,4; 2 — 2; 3 — 20 мс (x — протяженность короткого контакта)

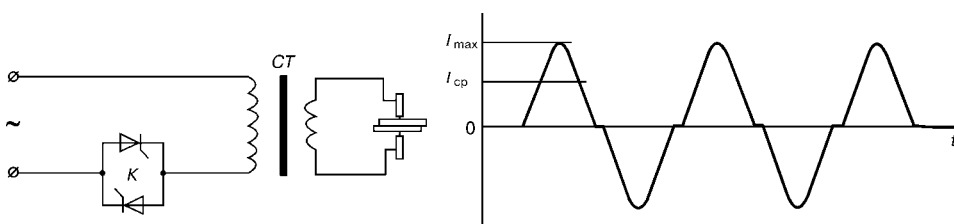
Очевидно, что чем меньше амплитуда тока отличается от его действующего значения, тем лучше.

Влияние других возмущений отчасти может быть компенсировано системой автоматического регулирования, если она достаточно совершенна.

При сварке оплавлением сопротивление короткого замыкания, определяющее форму внешней характеристики, оказывает большое влияние на устойчивость протекания процесса и его термический КПД. Этот вопрос подробно освещен в работах [1, 2] и здесь не рассматривается.

Любая машина для контактной сварки с одной парой электродов является однофазной (рис. 4), если она не укомплектована специальным преобразователем. Электроды присоединяются к трансформатору, включаемому в сеть тиристорным контактором. Недостаток машин данного типа состоит в том, что они неравномерно загружают трехфазную распределительную сеть. Ток в загруженных фазах в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при симметричной нагрузке той же мощности. По этой причине несимметричная нагрузка приводит к большему падению напряжения в распределительной сети, что неблагоприятно отражается на излучении осветительных приборов. Особенно заметно это влияние в связи с повторно-кратковременным режимом работы сварочного оборудования.

Несимметричная нагрузка приводит к искажению трехфазной звезды напряжений. В итоге в электрической сети возникает трехфазная система напряжений с обратным следованием фаз, вызывающая дополнительные потери энергии в асинхронных двигателях. Если мощность однофазной сварочной машины составляет не более $2/3$ мощности распределительного трансформатора, то, как показывают оценочные расчеты, эти дополнительные потери невелики и их вряд ли стоит принимать во внимание. Однофазные машины отличаются относительно низким коэффициентом мощности из-за значительного реактивного сопротивления вторичной цепи машины. Коэффициент мощности снижает и фазовое управление тиристорами. И еще один недостаток всех машин для



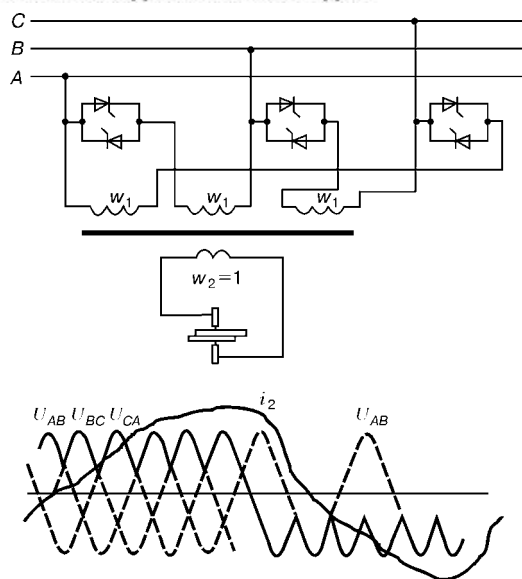


Рис. 5. Преобразователь частоты и числа фаз (A, B, C — фазы сети; w_1 , w_2 — соответственно первичная и вторичная обмотка сварочного трансформатора; i_2 — вторичный ток)

контактной сварки, связанный с повторно-кратковременным режимом работы, приводит к необходимости создания распределительных сетей «с запасом».

В настоящее время усилия создателей этого вида электротехнического оборудования направлены на разработку различного рода преобразователей, чему, несомненно, способствуют успехи в области силовой полупроводниковой техники. В рассмотренных ниже устройствах отсутствуют преобразователи с накопителями энергии, наибольшее распространение среди которых получили накопители из конденсаторов. Машины с такими преобразователями имеют хорошие энергетические показатели, но по технологическим возможностям уступают машинам с современными преобразователями частоты и числа фаз.

Для накопления энергии и ее последующего импульсного использования в процессе сварки в некоторых случаях целесообразны вращающиеся электромашинные преобразователи. В работе [3] сообщается об использовании униполярных генераторов постоянного тока для питания машин, рассчитанных на тысячи ампер. Автономные сварочные агрегаты типа рельсо- и трубосварочных, эксплуатируемых в полевых условиях, комплектуют мобильными электростанциями с трехфазными генераторами промышленной частоты. Ниже рассматриваются лишь полупроводниковые преобразователи частоты и числа фаз, сопоставляются машины, оснащенные такими преобразователями, с наиболее простыми и распространенными однофазными машинами (рис. 4). В общем виде возможно их сравнение по качественным показателям. Количественные показатели определяются не только выбором того или иного преобразователя, но и конкретным исполнением машины.

Один из первых преобразователей частоты и числа фаз был создан фирмой «Sciasu» более полувека назад (рис. 5). Он включает шесть тиристоров (игнитронов), а также специальный

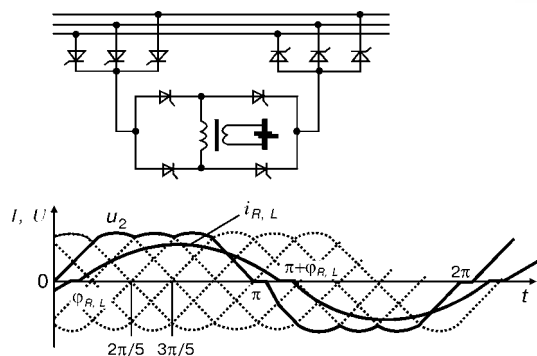


Рис. 6. Преобразователь частоты и числа фаз с переключателем полярности тока (u_2 — вторичное напряжение; $i_{R,L}$ — активно-индуктивное значение тока; $\varphi_{R,L}$ — фазовый сдвиг в случае активной нагрузки)

трансформатор с тремя первичными обмотками, рассчитанный на частоту вторичного тока 5 Гц. В каждом полупериоде низкой частоты работают три тиристора, которые по отношению ко вторичной цепи как бы имитируют трехфазное однополупериодное выпрямление тока промышленной частоты. К технологическим преимуществам машины с таким преобразователем следует отнести:

- значительно более пологую внешнюю характеристику благодаря низкой частоте и малому реактивному падению напряжения во вторичной токоведущей цепи;

- притупленную по сравнению с синусоидой форму вторичного тока.

Энергетические преимущества заключаются в следующем:

- достаточно высокий коэффициент мощности;
- практически равномерная загрузка фаз трехфазной распределительной сети;
- меньшие потери энергии в массивных элементах вторичной цепи в результате более равномерного распределения тока в них.

Недостатком машин является громоздкий и тяжелый трансформатор [4] из-за очень низкой частоты, которую целесообразно было бы несколько повысить. Однако при этом снизятся другие показатели. Машины с такими преобразователями, предназначенные для сварки стальных конструкций из листов и профилей с толщиной стенки до 10...12 мм, получили лишь ограниченное применение. Для указанных конструкций выгоднее использовать дуговую сварку.

Принципиальное отличие преобразователя, приведенного на рис. 6, состоит в том, что основу его составляет трехфазный двухполупериодный выпрямитель и обычный двухобмоточный трансформатор. Недостаток его заключается в том, что вместо шести тиристоров требуется десять. Четыре дополнительных тиристора образуют переключатель полярности тока. Возможен вариант с трехобмоточным трансформатором и двумя (вместо четырех) дополнительными тиристорами (рис. 7). Двухполупериодное выпрямление дает дополнительные возможности относительно выбора частоты. Такой преобразователь работает с хорошими энергетическими показателями в квазисимметричном режиме при частоте сварочного тока 30 Гц [5]. Под квазисимметричным режимом работы

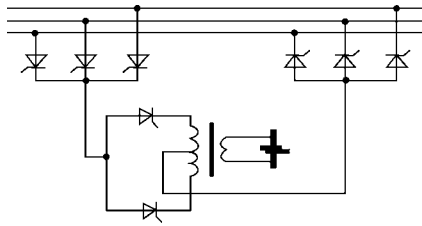


Рис. 7. Вариант преобразователя (см. рис. 6) с уменьшенным количеством тиристоров

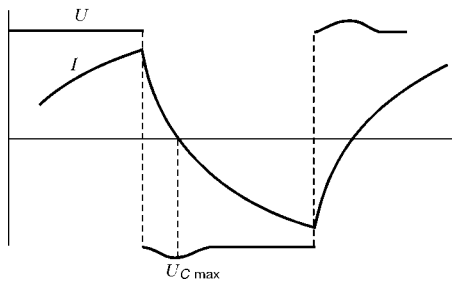
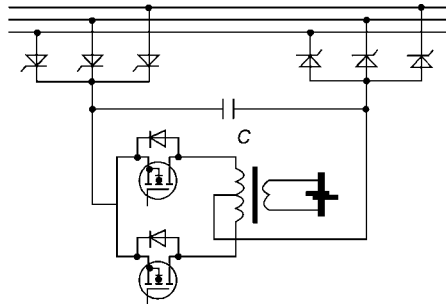


Рис. 8. Преобразователь с промежуточным звеном повышенной частоты и переключателем полярности на биполярных транзисторах (C — конденсатор; $U_{C \max}$ — максимальное напряжение на конденсаторе)

подразумевается режим, при котором симметричная нагрузка трехфазной сети зафиксирована в среднем за три полупериода тока низкой частоты. В пределах же одного полупериода обнаружены отклонения от симметрии.

В технологическом отношении машины с таким преобразователем имеют несомненные преимущества по сравнению с однофазной машиной, а также с машинами, оснащенными трехфазным однополупериодным преобразователем. При работе на частоте 30 Гц можно использовать практически такие же трансформаторы, как и в машинах переменного тока промышленной частоты, поскольку в диапазоне частот от 50 до 30 Гц сопротивление короткого замыкания машины падает почти пропорционально частоте, необходимое для сварки напряжение снижается.

Более совершенным следует считать аналогичный сварочный преобразователь с переключателем полярности на биполярных транзисторах с изолированным затвором (рис. 8). Подходящие для этой цели транзисторы уже существуют. Однако еще недостаточно изучены особенности их работы в силовых цепях сварочных преобразователей достаточной большой мощности, особенно при частоте сварочного тока ниже частоты сети. Целью такого исследования могла бы явиться оптимизация частоты.

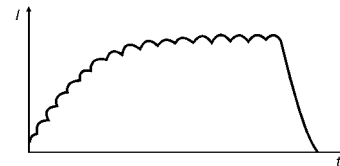
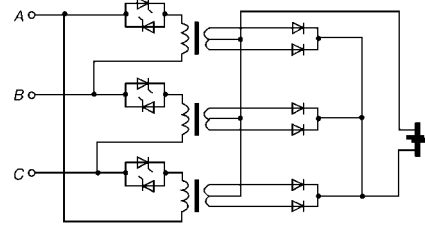


Рис. 9. Система питания для сварки постоянным током

Для машин малой мощности данные преобразователи на транзисторах, работающих на повышенной частоте, особенно перспективны. При соответствующей аппаратуре управления они позволят получать самые благоприятные для образования соединения циклы изменения сварочного тока. По своим технологическим свойствам машины с указанными преобразователями превосходят распространенные конденсаторные машины. Машины с преобразователями, приведенными на рис. 7, 8, найдут применение и для стыковой сварки, в том числе тонких полос [6].

В последнее десятилетие некоторые фирмы разработали машины для сварки сопротивлением и оплавлением с трехфазной группой трансформаторов (рис. 9). Вторичные обмотки этих трансформаторов соединены с вентилями, образующими шестифазную систему выпрямления. Нагрев свариваемых деталей осуществляют постоянным током. Данные машины отличаются хорошими технологическими свойствами при сварке сопротивлением, о чем имеется информация в рекламных материалах. Полагаем, что технологического эффекта главным образом достигают благодаря минимальной пульсации сварочного тока. Применение постоянного тока при сварке оплавлением изучали в работах [7–9]. Однако убедительные данные о технологических преимуществах постоянного тока для этого способа сварки отсутствуют.

Машины постоянного тока симметрично нагружают фазы электрической сети переменного тока, имеют относительно высокий коэффициент мощности и в этом отношении лучше других типов машин с преобразователями частоты и числа фаз. Но им присущ и очень существенный недостаток — низкий КПД. Так, при сварке сопротивлением стальных деталей падение напряжения на них редко превышает 1,5 В. На кремниевых вентилях во вторичной цепи машины снижение напряжения во время сварки приблизительно такое же или больше. С охлаждающей водой выбрасывается больше энергии, чем используется на сварку. При сварке изделий из алюминиевых сплавов относительные потери энергии еще больше.

При сварке непрерывным оплавлением без предварительного подогрева сопротивлением потери в вентилях относительно ниже из-за более

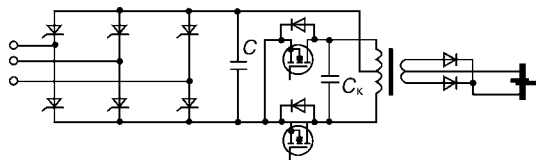


Рис. 10. Преобразователь с выпрямителем во вторичной цепи сварочного трансформатора (C_k — коммутирующий конденсатор)

высокого сопротивления сварочного контакта. Однако вентили создают дополнительное активное сопротивление, которое воздействует на устойчивость оплавления. Поэтому оплавление приходится выполнять при повышенном напряжении, что приводит к снижению термического КПД, производительности оборудования и дополнительной потере металла. В связи с этим можно высказать сомнение о целесообразности применения машин постоянного тока для сварки оплавлением.

Преобразователь, приведенный на рис. 10, включает выпрямитель, сглаживающий конденсатор, инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный повышенной частоты, и трансформатор с двумя вентилями. Этот преобразователь отличается от рассмотренного на рис. 8 только вентилями во вторичной цепи, благодаря чему возможна работа на более высоких частотах. Широтно-импульсное управление транзисторами переключателя полярности позволяет получать самые сложные циклы изменения сварочного тока, обеспечивающие и стабильное качество сварных соединений.

Преобразователи такого типа особенно перспективны для микросварки, когда дополнительные потери энергии в вентилях не имеют значения. Они незаменимы для подвесных машин, работающих в роботизированных линиях и производящих сварку изделий из металла с защитными металлическими покрытиями. В данном случае преобразователь позволяет снизить массу и изменить габариты машины, а также повысить стойкость электродов.

Выбирая тот или иной тип машины, нужно иметь в виду, что любая машина с преобразователем частоты и числа фаз значительно дороже простой однофазной с тиристорным контактором. Если в технологическом отношении однофазную машину можно признать подходящей, то существуют проблемы с ее подключением к распределительной сети. Таким образом, следует подумать о целесообразности вложения дополнительных средств в приобретение машины с преобразователем. Возможно, увеличение установленной мощности участка распределительной сети обойдется дешевле.

Выводы

1. Достижения в области силовой полупроводниковой техники открывают большие перспективы

Power systems for resistance welding machines have been analyzed, namely commercial-frequency single-phase and three-phase with a converter of frequency and phase number. A qualitative comparison of seven power systems has been conducted in terms of their technological properties, influence of disturbances on joint quality, electrode wear, as well as power characteristics.

для применения преобразователей частоты и числа фаз для контактной сварки.

2. При оценке перспективности применения машины с преобразователем следует учитывать не только возможный энергетический эффект, но и технологические преимущества, которые может дать преобразование энергии.

3. Однофазные машины с тиристорными контакторами и в будущем останутся наиболее распространенными, но области их применения ограничатся простыми технологическими задачами и относительно небольшой мощностью, предельное значение которой может быть определено в каждом конкретном случае исходя из условий электроснабжения.

4. Для сварки сопротивлением и оплавлением найдут применение машины с преобразователями на 30 Гц без вентилей во вторичной цепи сварочной машины. Эти машины имеют как технологические, так и энергетические преимущества по сравнению с простейшими однофазными, а по КПД и некоторым другим показателям превосходят машины постоянного тока.

5. Преобразователи с промежуточным звеном повышенной частоты следует применять в машинах для точечной и шовной микросварки, стыковой сварки тонких лент. Преобразователи такого же типа с вентилями во вторичной цепи сварочного трансформатора перспективны для машин, работающих в составе робототехнических линий производства изделий из сталей с покрытиями и алюминиевых сплавов, а также для машин, предназначенных для сварки различных особотонкостенных деталей, в том числе и с проводящими покрытиями.

1. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. — 440 с.
2. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
3. Контактная стыковая сварка трубопроводов / Под ред. С. И. Кучук-Яценко. — Киев: Наук. думка, 1986. — 207 с.
4. Подола Н. В., Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка токами низкой частоты // Автомат. сварка. — 1957. — № 1. — С. 63–72.
5. Лебедев В. К., Письменный А. А. Совершенствование систем питания машин для контактной сварки сопротивлением // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. междунар. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 130–136.
6. Лебедев В. К., Дубко А. Г. Совершенствование процесса сварки оплавлением тонких полос // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 48–50.
7. Лебедев В. К. Эффективность применения машин постоянного тока для контактной сварки // Там же. — 1992. — № 11/12. — С. 3–6.
8. Бокштейн О. Н., Канни А. М. Оборудование для контактной сварки постоянным током. — Л.: Энергия, 1976. — 104 с.
9. Thamodharan M., Beck H. P., Wolf A. Steady and pulsed direct current welding with a single converter // Welding J. — 1999. — № 3. — P. 75–79.

Поступила в редакцию 20.07.2001