



## СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

И. В. ЗЯХОР, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы современные тенденции развития оборудования для сварки трением, а также особенности конструирования машин для различных ее модификаций — конвенционной, инерционной и комбинированной. Описаны работы, проводимые в ИЭС им. Е. О. Патона с целью создания оборудования для сварки трением. Представлено краткое описание особенностей конструкции установки СТ-120, которая может стать базовой моделью нового поколения машин.

*Ключевые слова:* конвенционная, инерционная, комбинированная сварка трением, технология, оборудование, различные соединения, параметры процесса, осевое усилие, скорость вращения, стадия торможения, качество соединения

Одним из эффективных способов соединения сталей различных классов, цветных металлов и их сплавов является сварка трением, при которой сварное соединение образуется в результате совместного пластического деформирования соединяемых деталей в твердой фазе. Генерирование тепла происходит благодаря непосредственному преобразованию механической энергии, выделяемой по поверхности контакта деталей, которые прижаты друг к другу с определенной силой и участвуют в относительном перемещении.

Сваркой трением удается успешно соединять материалы, резко отличающиеся по своим механическим и теплофизическим характеристикам, а также материалы, вступающие в процессе совместного нагрева в химическое взаимодействие и образующие хрупкие интерметаллидные соединения.

В настоящее время машины для сварки трением широко применяются во всем мире в различных отраслях промышленности (автомобиле-, тракторо-, авиа-, приборо- и станкостроении, а также в электротехнике) и дают огромный экономический эффект. Поэтому развитие этих машин идет не по пути упрощения и удешевления конструкции, а по пути ее совершенствования, направленного на расширение технологических возможностей, увеличение производительности, стабильности работы, точности и качества сварки.

Наиболее распространены машины, реализующие конвенционный и инерционный способы сварки трением [1–3]. Основные конструктивные схемы указанных машин подобны. Общими узлами и системами в них являются передняя бабка, несущая шпиндель с вращающимся зажимом, суппорт с невращающимся зажимом, приводы осевого усилия и вращения шпинделя, система управления. Отличительная особенность конвенционных машин заключается в применении привода вращения прямого действия, наличии тормозного устройства. Для инерционных машин характерно наличие набора сменных маховиков, жестко связанных со шпинде-

лем, который для машин малой и средней мощности должен иметь минимальный собственный момент инерции. Специфика инерционного способа предопределяет более жесткие требования к приводу осевого усилия и механическим узлам, особенно к надежности зажимных патронов и шпиндельных подшипников.

В настоящее время в мире накоплен большой опыт по общей компоновке и конструированию отдельных узлов машин. Многие решения стали типичными и используются во всех машинах. Тем не менее в конструкциях оборудования различных фирм имеются и оригинальные решения, улучшающие качество машины.

Поскольку оборудование для сварки трением ориентировано на использование в массовом производстве, то к нему предъявляются жесткие технические требования, влияющие на конструктивное оформление, оснащение автоматикой и контрольно-измерительной аппаратурой. Так, например, ограничение допусков на линейные и угловые размеры сварных деталей обусловило увеличение жесткости станины и создание замкнутого силового пояса в системе осевого давления; кратковременность цикла сварки и большие осевые усилия предопределили применение гидросилового привода, отличающегося высокой скоростью срабатывания; большая частота включения шпинделя при значительных силовых нагрузках вызвала необходимость охлаждения фрикционных механизмов (муфта сцепления и тормоз), а также масла гидросистемы и подшипниковых узлов шпинделя при помощи циркуляционной системы смазки; высокие требования к стабильности качества сварки и точности линейных размеров обусловили применение высокоэффективных систем управления процессом с осуществлением пассивного или активного контроля основных параметров сварки.

Современные машины, как правило, максимально автоматизированы, т. е. имеют автоматический цикл сварки, включающий возможность снятия графика, автоматический контроль параметров сварки, блокировочный контроль многих параметров и т. д. В связи с этим машины оснащены автономной гидростанцией с элементами гидро- и электроавтоматики, шкафом электроавтоматики, пультом управления (как с ручным, так и автоматическим управ-

лением отдельными узлами машины). Универсальная машина для сварки трением должна обеспечивать регулируемые в широких пределах осевое усилие и частоту вращения шпинделя.

Стремление разработать технологию, совмещающую преимущества конвенционного и инерционного способов сварки, привело к идее создания комбинированной конвенционно-инерционной технологии. Для реализации комбинированного режима сварки необходимо сконструировать специальные установки с приводом вращения прямого действия и минимальным моментом инерции шпиндельного узла, снабдить их набором сменных маховиков. Требования к конструкции механических узлов при этом должны соответствовать таковым для инерционных машин.

Разновидностью машин, сочетающих возможности конвенционного и инерционного способов сварки, являются машины, работающие на максимальном моменте трения  $M_{тр}$  в течение всего нагрева [4]. Постоянное и максимальное значения  $M_{тр}$  обеспечиваются за счет снижения скорости и плавного увеличения давления нагрева. Этот способ реализован лишь в некоторых машинах фирмы «Sciaky» (Франция), снабженных гидроприводом с программным управлением параметрами режима сварки в зависимости от момента трения в стыке.

Несомненный практический интерес представляют попытки реализации комбинированного режима на стандартных конвенционных машинах. Так, на Минском тракторном заводе [5] использование технологии сварки заготовок различных диаметров без применения тормоза (торможение происходит только за счет момента трения в стыке) позволило повысить качество соединений. Аналогичные эксперименты проводили в ИЭС им. Е. О. Патона [6, 7], а также за рубежом [8–10]. На основании этих исследований можно сделать вывод, что серийную конвенционную машину целесообразно использовать для комбинированной сварки только в узком диапазоне сечений заготовок, когда суммарный момент инерции вращающихся частей является оптимальным. Рекомендовать применение сварки без искусственного торможения можно лишь для специальных машин, рассчитанных на сварку заготовок одного или нескольких близких по размеру сечений.

Работы в ИЭС им. Е. О. Патона в области оборудования проводятся в настоящее время в двух направлениях. Первое состоит в разработке схем модернизации серийных машин, выпускавшихся в бывшем СССР, с целью реализации технологии комбинированной сварки для широкого диапазона свариваемых сечений. Второе заключается в создании машин нового поколения с компьютеризованным управлением, позволяющим изменять в широком диапазоне параметры режима сварки (частоту вращения и осевое усилие) и обеспечивающим регулирование динамических характеристик исполнительных механизмов, в том числе на заключительной стадии процесса сварки. Такие машины позволят реализовать режимы сварки, при которых обеспечатся как «мягкие», так и «жесткие» термомеханические условия образования соединения,

характерные для конвенционной и инерционной сварки трением.

Исследования, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона, показали возможность реализации технологии комбинированной сварки деталей с широким диапазоном диаметров на серийных конвенционных машинах [11, 12] за счет модернизации схемы управления и исполнительных механизмов. На модернизированных машинах обеспечивается возможность управления стадией торможения независимо от размера свариваемого сечения деталей, что расширяет технологические возможности машин при сварке многих металлов и сплавов в разнородном сочетании и тавровых соединений.

В настоящее время успешно эксплуатируется разработанная и изготовленная в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины установка СТ-120, которая станет базовой моделью нового поколения машин, реализующих технологию сварки трением с регулируемым торможением. Основная задача проводимых работ — расширение технологических возможностей оборудования за счет программирования динамики изменения основных технологических параметров, в том числе на заключительной стадии процесса.

Установка СТ-120 предназначена для сварки трением сталей, цветных металлов и их сплавов в однородном и разнородном сочетаниях.

Технические характеристики установки СТ-120

Мощность привода вращения, кВт	30
Усилие осадки максимальное, кН	120
Диаметр свариваемых заготовок, мм:	
сплошное сечение	10... 30
трубы	до 40
Частота вращения максимальная, с <sup>-1</sup>	65
Производительность, сварок в час	до 120
Масса машины сварочной, кг	2100
Масса установки, кг	3200

В состав установки СТ-120 (рис. 1) входят сварочная машина 1, насосная установка 2, шкаф управления 3, станция смазки 4. Насосная установка 2 и станция смазки 4 представляют собой доработанные варианты гидростанций 2С 160.В2 и СВ-М1-40, которые снабжены электрогидравлической распределительной и контрольно-регулирующей аппаратурой, выполненной на базе унифицированных функциональных блоков. Аппаратура управления установкой, в том числе программируемый контроллер, блоки управления сваркой и приводом вращения, размещена в шкафу управления 3.

Сварочная машина (рис. 1, б) является стационарной с горизонтальным расположением шпинделя и неподвижной передней бабкой. На станине установлены шпиндель и подвижная стойка, соединенные двумя цилиндрическими штангами, образующими силовую раму, которая воспринимает поперечный крутящий момент, равный моменту трения в стыке свариваемых заготовок. Осевое сварочное усилие создается двумя гидроцилиндрами, установленными со стороны шпинделя. Таким образом, обеспечивается разгрузка станины машины от продольного изгибающего момента, что позволяет существенно снизить массу и габаритные размеры машины.

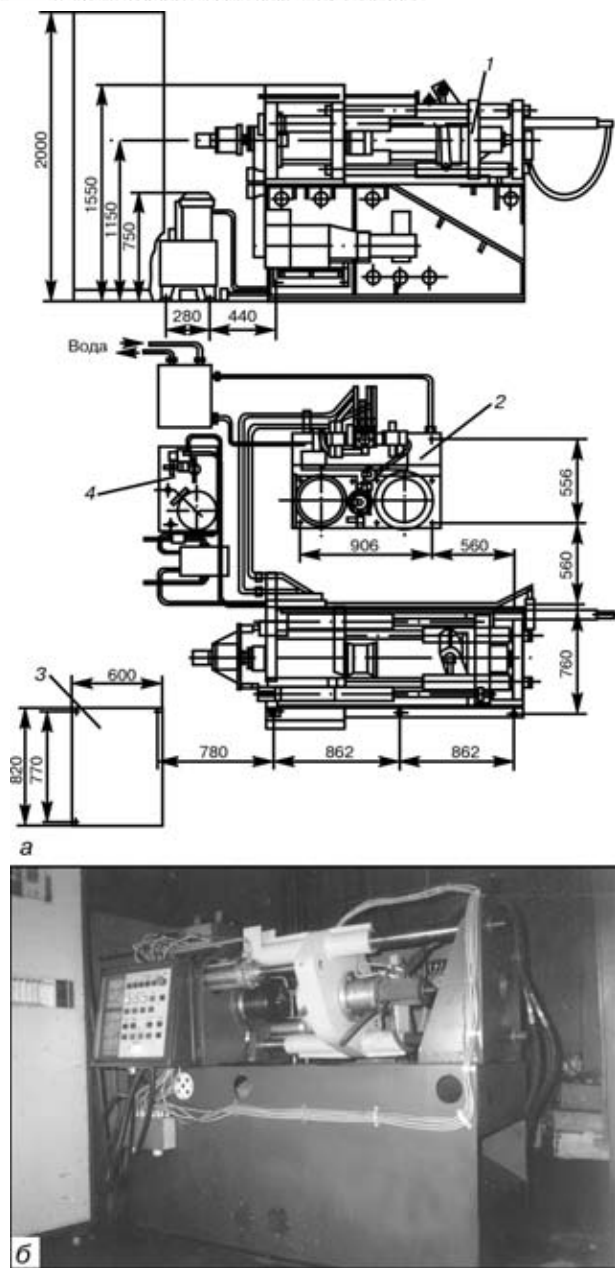


Рис. 1. Установка для сварки трением СТ-120: а — схема; б — общий вид

Силовой привод — гидравлический с двумя рабочими давлениями (высоким 18 МПа и низким 5 МПа). Гидросхемой предусмотрены раздельное включение и независимая регулировка давления в исполнительных цилиндрах зажатия, тормозной системы и осадки. Гидропривод обеспечивает трехступенчатую циклограмму приложения осевого усилия притирка–нагрев–проковка в диапазоне 5...120 кН, позволяет задавать требуемую по технологии сварки скорость нарастания усилия нагрева и проковки, а также осуществлять активный контроль процесса. Важным условием стабильности давления в исполнительных механизмах является стабильность температуры масла в гидросистеме во время работы машины. Для обеспечения этого условия гидросистема снабжена водоохлаждаемым охладителем масла.

Передняя бабка, служащая для приведения во вращение одной из заготовок, а также для воспри-

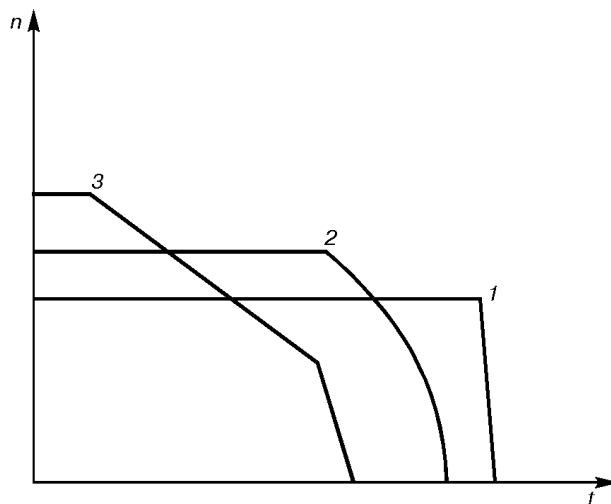


Рис. 2. Циклограмма изменения частоты вращения  $n$  при различных вариантах сварки трением с регулируемым торможением: 1 — конвенционный; 2 — комбинированный; 3 — квазиинерционный процесс;  $t$  — время

ятия осевого усилия, несет на себе шпиндель, свободно вращающийся в подшипниках, на одном конце которого закреплен зажимной патрон, на другом — шкив привода вращения. Отличительной особенностью шпинделя является незначительный ( $0,265 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ) собственный момент инерции, способствующий быстрому торможению вращения заготовок на этапе проковки, что чрезвычайно важно при сварке заготовок малого диаметра.

Пятикулачковые зажимные патроны шпинделя и подвижной стойки имеют гидравлический привод, снабжены регулируемыми упорами и обеспечивают взаимное центрирование свариваемых заготовок с точностью до 0,2 мм. Усилие предварительного зажатия подбирается из условия предупреждения проворачивания заготовок в процессе притирки, отличающейся незначительным осевым усилием. При увеличении усилия в фазах нагрева и проковки усилие зажатия возрастает пропорционально осевому усилию, при этом обеспечивается надежное закрепление без проскальзывания и проворачивания заготовок сплошного и трубчатого сечения при минимальной деформации их поверхности. Патрон подвижной стойки снабжен водоохлаждаемой осадочной матрицей, предназначенной для принудительного формирования соединения преимущественно при сварке разнородных материалов.

В качестве привода вращения применен электропривод постоянного тока типа ЭПУ-1-1-4047 с исполнительным двигателем мощностью 30 кВт, соединенным со шпинделем посредством ременной передачи. Привод отличается высокой степенью поддержания угловой скорости и обеспечивает бесступенчатую регулировку частоты вращения шпинделя до 3900 об/мин. Важным преимуществом привода является возможность проведения стадии притирки при повышенной частоте вращения и поддержания оптимальной частоты вращения на стадии нагрева, а также быстрой остановки вращения шпинделя за счет электродинамического торможения привода на стадии проковки.

Благодаря использованию электропривода постоянного тока, выдерживающего частые пуски и остановки, в конструкции машины удалось отказаться от муфты сцепления, существенно увеличивающей момент инерции вращающихся масс.

Программирование автоматического цикла сварки и контроль процесса осуществляется программируемым контроллером «МикроДАТ» МБ5702 (ПК-64). Контроль и управление работой исполнительных механизмов выполняется посредством сигналов от бесконтактных торцевых переключателей, электроконтактных манометров, датчиков давления, реле расхода, измерительного преобразователя давления «Сапфир», подключенных к входным цепям модуля ПК-64. Для удобства визуального контроля соответствующих операций цикла сварки на входных и выходных модулях контроллера предусмотрена световая индикация включенного состояния датчиков и механизмов. Программирование цикла сварки может осуществляться как по времени с точностью до 0,1 с, так и по осадке нагрева с точностью до 0,1 мм при помощи фотоэлектрического преобразователя угловых перемещений ВЕ178А5.

На установке СТ-120 обеспечивается возможность программирования основных технологических параметров, динамики приложения усилия проковки, что позволяет в зависимости от диаметра, формы сечения и материала свариваемых заготовок реализовать режимы конвенционного или комбинированного процесса сварки трением в широком диапазоне свариваемых сечений.

В процессе выполнения исследовательских работ была проведена модернизация схемы управления приводом вращения и исполнительным гидрориводом торможения, направленная на расширение технологических возможностей установки СТ-120 посредством управления динамикой торможения на заключительной стадии процесса сварки.

Модернизированная схема управления в сочетании с использованием фрикционного многодискового тормоза с регулируемым гидравлическим приводом позволяет управлять процессом торможения вращения по заданной программе и реализовать новую технологию сварки трением с регулируемым торможением (рис. 2). При сварке по этой технологии можно обеспечить термодформационные условия формирования соединений, аналогичные таковым при конвенционном процессе (быстрое торможение — кривая 1), комбинированном процессе (постоянная скорость вращения при нагреве и инерционное завершение — кривая 2) и для определенного диапазона диаметров — квазиинерционном процессе (убывающая во времени частота вращения — кривая 3).

На рис. 3 представлены изделия, выполненные сваркой трением с регулируемым торможением на установке СТ-120. Наилучшие результаты по сварке рычага коробки передач автомобиля «Москвич» (сталь 12ХН2А) получены при сравнительно быстром торможении вращения (аналогично конвенционному процессу). Оптимальные условия формирования соединений роторов турбокомпрессоров дизельных двигателей (сплав ЖС-ЗДК + сталь 40Х) обеспечиваются при комбинированном про-

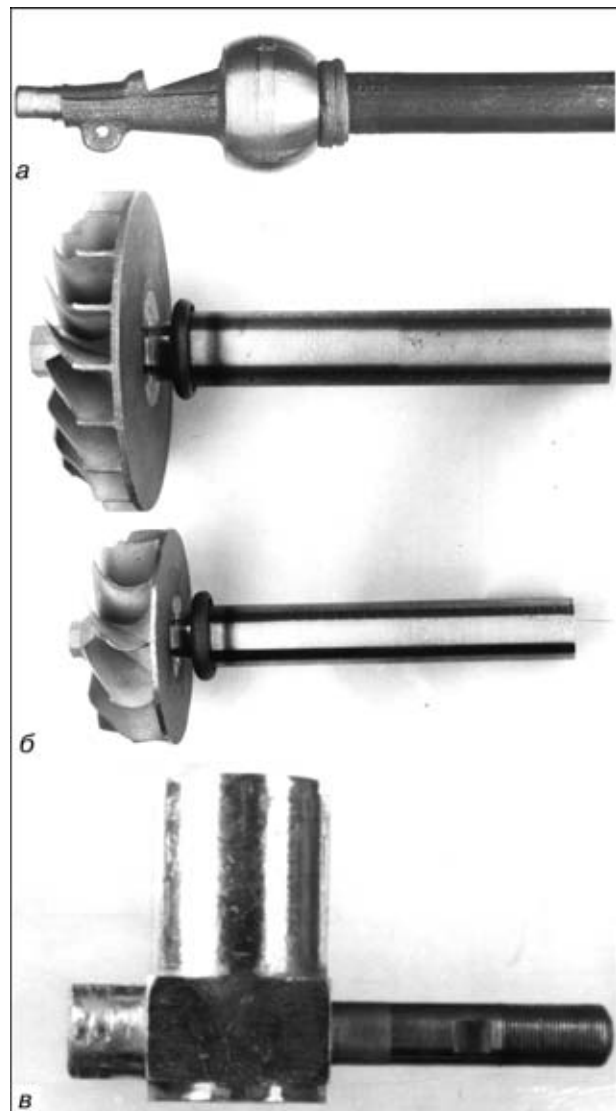


Рис. 3. Изделия, выполненные сваркой трением с регулируемым торможением на установке СТ-120: а — рычаг коробки передач автомобиля «Москвич»; б — роторы турбокомпрессоров дизельных двигателей; в — сталеалюминиевый переходник

цессе, а соединений биметаллических сталеалюминиевых переходников — при квазиинерционном.

Технологические и технические решения, заложенные в конструкции установки СТ-120, а также новые, реализованные при последующей ее модернизации, являются базой для разработки ряда универсальных и специализированных машин с различным осевым усилием и дальнейшего совершенствования оборудования для сварки трением.

## Выводы

1. Основными тенденциями создания оборудования для сварки трением являются совершенствование конструкции, повышение уровня автоматизации процесса сварки и контроля качества соединений, направленные на расширение технологических возможностей, увеличение стабильности работы, производительности, точности и качества сварки.

2. Работы, проводимые в настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона в области совершенствования оборудования для сварки трением, направлены на разработку схем модернизации серийных конвенцион-



ных машин и создания машин нового поколения, обеспечивающих регулирование динамических характеристик исполнительных механизмов и реализующих различные разновидности процесса сварки трением.

3. Установка СТ-120, разработанная и изготовленная в ИЭС им. Е. О. Патона, благодаря своим конструктивным особенностям и техническим решениям, реализованным в процессе исследовательских работ, может стать базовой моделью нового поколения машин для сварки трением с программируемой динамикой изменения технологических параметров.

1. Вилль В. И. Сварка металлов трением. — Л.: Машиностроение, 1970. — 175 с.
2. Сварка трением. Справочник / В. К. Лебедев, И. А. Черненко, В. И. Вилль и др. — Л.: Машиностроение, 1987. — 236 с.
3. Lebedev V. K., Chernenko I. A. Friction welding // Sov. Tech. Rev. C. Weld. Surf., — 1992. — 4. — P. 59–168.
4. «Sciaky» // Bulletin d'information interieure. — 1977. — № 25. — S. 12.

5. Воинов В. П., Ведерников Н. М., Болдырев Р. Н. Особенности промышленной технологии сварки трением // Свароч. пр-во. — 1986. — № 10. — С. 9–10.
6. Лебедев В. К., Мургород Ю. А., Цуруль И. А. Сварка трением цилиндрических заготовок неравных сечений // Автомат. сварка. — 1989. — № 4. — С. 66–69.
7. Свойства соединений, выполненных сваркой трением из стальных заготовок неравных сечений / И. А. Черненко, А. В. Решетняк, В. Э. Филатов и др. // Там же. — 1989. — № 7. — С. 68–71.
8. Foister P. V. Heat under power (HUP) friction welding // Proc. Third intern. conf. on advances in welding proc. (Harrogate, 7–9 May, 1974). — Harrogate, 1974. — P. 243–248.
9. Duffin F. D., Bahrani A. S. The deceleration phase in the friction welding of mild steel // Welding Research Intern. — 1976. — 6, № 1. — P. 1–19.
10. Серегин С. А., Серегин А. С. Сварка металлов трением без искусственного торможения // Свароч. пр-во. — 1982. — № 9. — С. 11–13.
11. Кучук-Яценко С. И. Состояние и перспективы развития сварки давлением // Сварка и родственные технологии в XXI век: Сб. науч. тр. междунар. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 110–119.
12. Kuchuk-Yatsenko S. I., Zyakhor I. V. Friction welding of dissimilar metals // Exploiting solid state joining Intern. conf. (Cambridge, 13–14 Sept., 1999). — Cambridge, 1999. — P. 141–149.

Current trends in development of equipment for friction welding and peculiarities of designing of machines for its modifications, such as conventional, inertia and combined friction welding, are analysed. The work performed at the E. O. Paton Electric Welding Institute in the area of development and manufacture of the friction welding equipment is described. Peculiarities of design of the ST-120 machine, which can be the basic model for a new generation of the friction welding machines, are presented.

Поступила в редакцию 16.01.2001