

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, А. А. НАКОНЕЧНЫЙ, И. В. ЗЯХОР, С. В. ЧЕРНОБАЙ, М. С. ЗАВЕРТАННЫЙ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Контактная сварка сопротивлением находит новые области применения. Цель работы — разработка технологии контактной стыковой сварки (КСС) сопротивлением тавровых соединений штоков и проушин гидроцилиндров из разнородных сталей 45 и 17ГС в диапазоне диаметров от 16 до 60 мм. Задачи исследований — выбор оптимальной технологической схемы процесса КСС сопротивлением деталей большого сечения, отработка технологических приемов, обеспечивающих локализацию процессов нагрева и деформации металла в зоне контакта. Исследовали процесс КСС сопротивлением и структуру соединений разнородных сталей 45 и 17ГС, выполненных с предварительной подготовкой свариваемых кромок и с использованием композиционных вставок. Установлено, что при КСС сопротивлением тавровых соединений сталей 45 и 17ГС с оптимальной подготовкой свариваемых кромок и программируемым изменением сварочного усилия на стадии нагрева удается локализовать тепловыделение в зоне сварки, избежать образования дефектов и обеспечить высокие механические характеристики сварных соединений. При механических испытаниях сварных штоков на загиб разрушение происходит по основному металлу штока. Разработана технология КСС сопротивлением тавровых соединений разнородных сталей с использованием композиционных вставок. Технология КСС сопротивлением штоков гидроцилиндров диаметром 16...60 мм реализована на специализированной сварочной машине К1040, спроектированной и изготовленной в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Библиогр. 14, рис. 15.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка сопротивлением, тавровое соединение, шток гидроцилиндра, разнородные стали, сварное соединение, подготовка свариваемых кромок, композиционная вставка

Для отечественного машиностроения актуальной проблемой является разработка и внедрение эффективной высокопроизводительной технологии сварки штоков гидроцилиндров. Заготовки штока из высокопрочной стали 45 диаметром 16...60 мм необходимо соединять с проушинами из стали 17ГС диаметром 20...200 мм с толщиной стенки 5...24 мм. Значительный объем производства сварных штоков гидроцилиндров обуславливает необходимость применения высокопроизводительных технологий и оборудования, которые обеспечивают выполнение в автоматическом или полуавтоматическом режиме операций по зажатию, центровке и сварке, а также, в ряде случаев, термической обработке изделий.

В настоящее время в различных отраслях промышленности используются высокопроизводительные способы сварки давлением, в частности, сварка трением и контактная стыковая сварка (КСС). Сварка трением удовлетворяет большинству из указанных выше требований, однако весьма высокая стоимость современного оборудования является сдерживающим фактором использования ее в отечественном машиностроении.

Проведенный анализ показал, что с точки зрения технической и экономической эффективности решению задачи сварки штоков гидроцилин-

дров в наибольшей степени отвечает применение КСС сопротивлением. Этот способ широко используется в промышленности для неразъемного соединения металлорежущего инструмента, ленточных пил, проводов, прутков, трубок из сталей и цветных металлов [1–3]. Широкое распространение КСС сопротивлением получила благодаря высокой производительности, гигиеничности процесса, приемлемой стоимости оборудования, необходимого для его осуществления. Актуальной является КСС сопротивлением с использованием промежуточных прослоек при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов [4], перспективных конструкционных материалов, в частности, сплавов на основе алюминидов титана [5, 6], порошковых материалов [7].

Однако традиционной технологии КСС сопротивлением присущи некоторые недостатки, в частности, снижение механических свойств соединений, особенно показателей пластичности [1, 8], что связано с перегревом металла, формированием в зоне соединения крупнозернистой структуры, а также дефектов в виде оксидных пленок и микротрещин. В значительной степени это проявляется при сварке деталей большого сечения. Проблема обеспечения стабильно высокого качества сварных соединений при КСС сопротивлением изделий

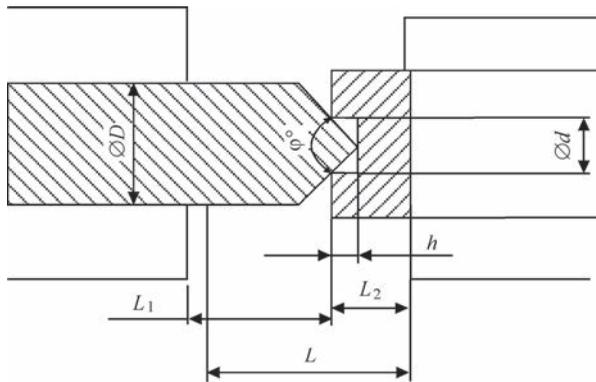


Рис. 1. Схема предварительной подготовки свариваемых кромок штока и проушины при КСС сопротивлением

из высокопрочных сталей большого сечения является актуальной в течение многих лет.

Цель работы — разработка технологии КСС сопротивлением тавровых соединений штоков и проушин гидроцилиндров из разнородных сталей 45 и 17ГС в диапазоне диаметров от 16 до 60 мм.

Штоки гидроцилиндров изготавливаются из углеродистой стали 45, которая имеет в состоянии поставки показатели: предел прочности 590 МПа, твердость HB 2100 МПа, поверхность штока покрыта хромом толщиной 0,15 мм. Проушина изготавливается фрезерованием из стали 17ГС, имеет в состоянии поставки предел прочности 510 МПа, HB 1800 МПа.

При проведении экспериментов использовали сварочную установку К1040, разработанную и изготовленную в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Машина К1040 обеспечивает реализацию процесса КСС сопротивлением с постоянным или ступенчатым изменением сварочного усилия в диапазоне от 600 до 7200 кг. Система управления машины на базе КСУ КС02 обеспечивает автоматический цикл сварки и термообработки, контроль качества и регистрацию параметров сварки, а также управление преобразователем частоты.

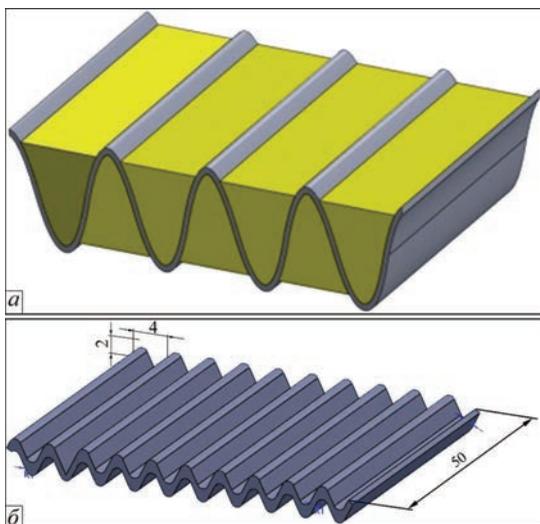


Рис. 2. Схема КВ с активирующим флюсом (а), металлическая профилированная вставка (б)

При КСС сопротивлением деталей большого сечения преобладают значительные нагрузки на электрическую сеть с импульсным увеличением тока. Поэтому использовали трехфазно-однофазный преобразователь [9], обеспечивающий равномерную трехфазную нагрузку сети.

Исходными требованиями при разработке технологии КСС сопротивлением тавровых соединений штоков гидроцилиндров являлись обеспечение формирования бездефектных соединений с механическими свойствами на уровне показателей основного металла, соблюдение заданных допусков на размеры изделия. Известно, что высокое качество соединений при КСС сопротивлением обеспечивается при высоких плотностях тока, минимальном времени нагрева, соответствующих конкретному сечению заготовок циклах тока и давления (постоянном или ступенчатом), увеличенных припусках на осадку [1, 3]. В этом случае исключается образование крупнозернистой структуры и обеспечивается удаление загрязнений, оксидных фаз и перегретого металла из зоны сварки.

Для процесса КСС сопротивлением тавровых соединений разнородных сталей характерны значительные отличия в условиях нагрева прилегающих к стыку объемов металла деталей, что обуславливает асимметрию условий деформации, усложняет вытеснение из стыка пленок оксидов и формирование качественных соединений. Поэтому при разработке технологии КСС сопротивлением штоков гидроцилиндров ставились задачи изыскания способов локализации процессов нагрева и деформации металла в зоне контакта, повышения эффективности диспергирования, растворения оксидных фаз и их вытеснения из стыка.

При отработке технологии сварки штоков гидроцилиндров исследовали следующие технологические схемы: КСС сопротивлением с предварительной подготовкой свариваемых кромок — схема 1 (рис. 1), КСС с применением композиционных вставок (КВ) — схема 2 [10] (рис. 2). Предполагалось, что предварительная подготовка кромок и использование КВ позволит расширить технологические возможности процесса КСС сопротивлением заготовок большого сечения при получении разнородных соединений конструкционных сталей.

КВ (рис. 2) состоит из металлической основы и флюса [10], состав которого задается таким образом, чтобы температура $T_{пл-ф}$ его плавления была ниже температуры плавления $T_{пл-ом}$ основного металла свариваемых деталей. Наличие флюса позволяет защитить нагретый в зоне контакта металл от окисления, обеспечивает формирование качественных соединений в процессе осадки дета-

лей. При этом появляется возможность получения соединений при температуре нагрева приконтактных слоев металла ниже температуры солидус основного металла, а для формирования соединений необходима меньшая деформация торцов, чем при традиционной технологии КСС сопротивлением.

Основу КВ составляет профилированный лист (рис. 2, б), высота и шаг профиля выбираются из расчета допустимой плотности тока и определяют интенсивность тепловыделения в контакте. Форма рельефа КВ влияет на интенсивность тепловыделения в зоне контакта, особенно на начальном этапе нагрева, и на формирование сварного соединения. Повышение концентрации тепловыделения определяется высокой плотностью тока в зоне контакта. Параметры металлической профилированной вставки изменяли в пределах: толщина листа 0,8...2,0 мм, шаг профиля 2...4 мм, высота вершин 1...2 мм.

Состав сварочного флюса является одним из определяющих факторов технологии КСС сопротивлением с использованием КВ. Флюс защищает зону сварки от атмосферы, является источником тепловыделения в зоне контакта деталей, очищает поверхность металла от оксидных пленок и способствует растеканию расплавленного металла по поверхности. Кроме того, флюс раскисляет металл в контакте деталей и влияет на смятие профилированной вставки. Для обеспечения высокого качества сварного соединения свойства флюса должны отвечать следующим требованиям: вступать во взаимодействие с оксидами раньше образования жидкой металлической фазы; смачивать металл свариваемых деталей и металл вставки, не вызывать коррозионного воздействия на соединяемые детали, не изменять своего химического состава при нагревании вследствие испарения отдельных компонентов.

В работе использовались оксидно-солевые флюсы системы $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7\text{-Li}_3\text{AlF}_6\text{-TiO-KF}$ и солевой флюс системы $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7\text{-CaF}_2\text{-BaF}_2\text{-LiF}$. Флюс наносили в виде спиртового шликера на поверхность профилированной вставки. В состав флюса в качестве вяжущего добавляли 5 % нитролаков, что предотвращало осыпание флюса после высыхания с поверхности профилированной вставки. Для образования жидкой фазы, смачивания им поверхностей свариваемых деталей и вытеснения из стыка остатков флюсования в состав флюса входили элементы-депрессанты, которые вступают в реакцию контактного плавления с металлом деталей и профилированной вставки. При сварке углеродистых и низколегированных сталей этими элементами являются углерод и марганец, вводимые в состав флюса в количестве 15 и 10 % соответ-

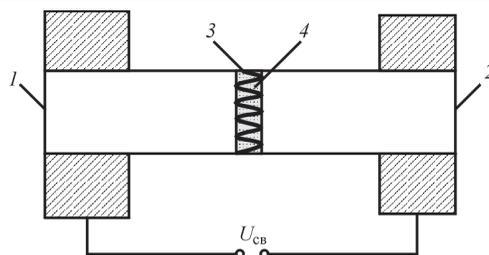


Рис. 3. Схема процесса КСС с использованием КВ: 1, 2 — детали; 3 — КВ с флюсом (4)

ственно. Это позволяет получить жидкую металлическую фазу уже при 1150 °С.

На начальной стадии процесса КСС сварочный флюс препятствует смятию рельефа металлической профилированной вставки. При пропускании электрического тока через стык с КВ (рис. 3), наблюдается интенсивный нагрев и расплавление вставки вследствие значительного внутреннего сопротивления. При этом происходит локализация нагрева по сравнению с традиционным способом нагрева сопротивлением. Значение переходного сопротивления в зоне контакта затем снижается (рис. 4), что согласуется с данными работы [11].

Выбор циклограммы изменения параметров процесса КСС сопротивлением проводили исходя из литературных данных [1, 3], результатов предшествующих исследований авторов [12] и технических возможностей сварочного оборудования. В сварочной машине К1040 усилия сжатия обеспечиваются четырехсекционным пневмоцилиндром, что позволяет путем переключения пневмоклапанов каждой секции, управляемых микропроцессором, реализовать требуемую циклограмму процесса КСС сопротивлением (рис. 5).

Первая серия экспериментов по КСС сопротивлением штоков гидроцилиндров из сталей 45 и 17ГС была проведена с применением предварительной подготовки кромок по схеме, представленной на рис. 1. Параметры подготовки кромок были оптимизированы таким образом, чтобы первоначальный контакт был у вершины конуса и дна проточки, а общий припуск на сварку устанавливали в зависимости от диаметра заготовок таким

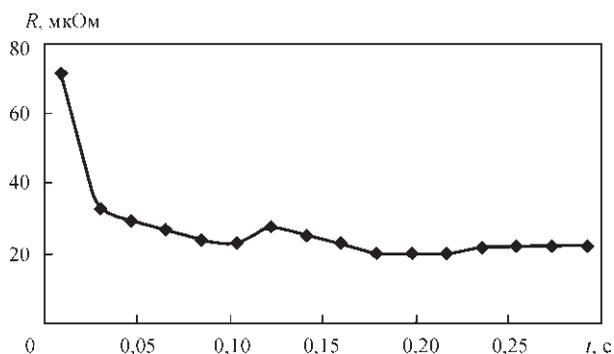


Рис. 4. Изменение во времени полного сопротивления R в зоне контакта при КСС сопротивлением сталей 45 и 17ГС (диаметр образцов 32 мм)

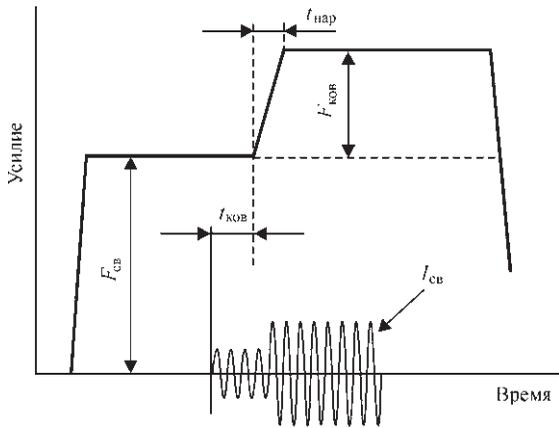
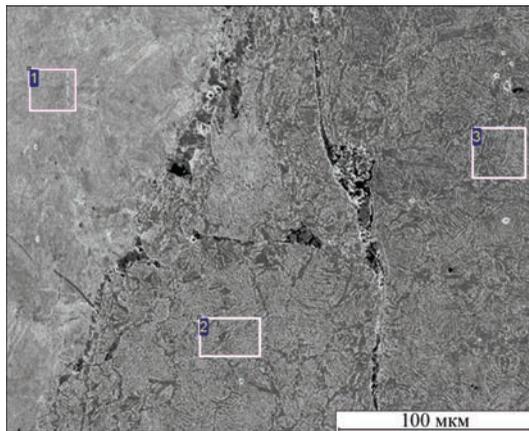


Рис. 5. Циклограмма процесса КСС сопротивлением с программируемым изменением усилия сварки



Спектр	С	О	Si	Mn	Fe
1	2,19	1,00	0,27	0,73	95,81
2	1,41	0,70	0	1,02	96,87
3	1,47	0,49	0,21	1,43	96,40

Рис. 6. Микроструктура сварного соединения сталь 45 — сталь 17ГС, выполненного по схеме 1 при одноступенчатой циклограмме усилия

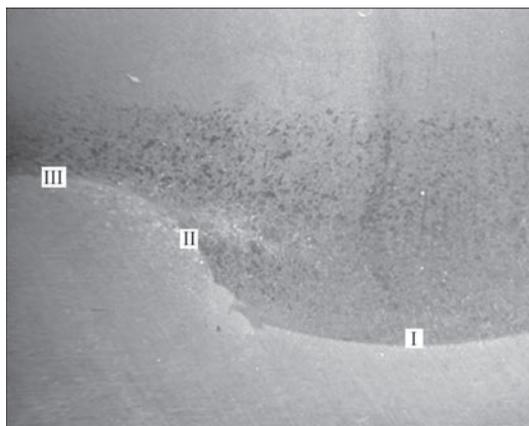


Рис. 7. Макроструктура ($\times 4$) сварного соединения сталь 45 — сталь 17ГС (микроструктура указанных участков приведена на рис. 8–10)

образом, чтобы при пластической деформации заготовок остатки литого металла, оксидные пленки вытеснялись за пределы свариваемого сечения.

Исследовали формирование соединений при КСС сопротивлением по схеме 1. Такая схема ре-

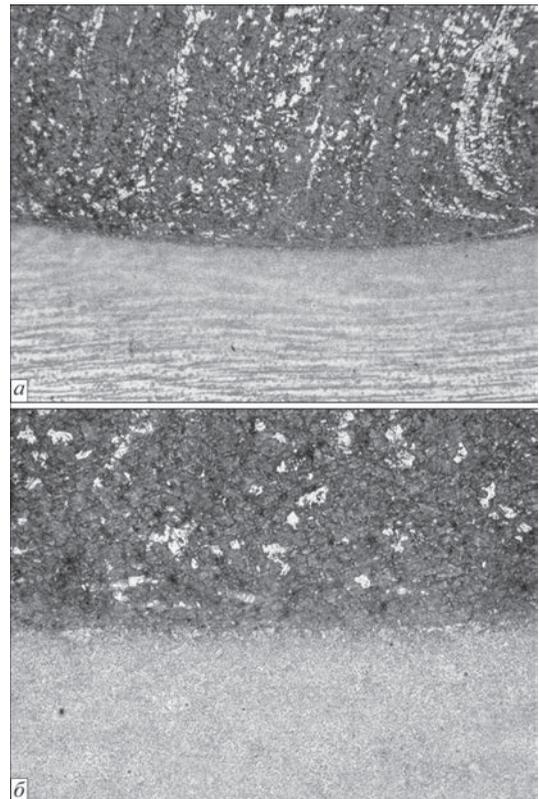


Рис. 8. Микроструктура металла участка I, $\times 25$ (а), $\times 100$ (б)

комендуется [13, 14] для сварки тавровых соединений и называется «сваркой по острой кромке». Проведенными исследованиями установлено, что при КСС с одноступенчатой циклограммой приложения усилия сварки не удается локализовать тепловыделение в зоне сварки, в стыке обнаруживаются остатки литого металла и образуются дефекты вследствие запрессовки воздуха в соединении (рис. 6). Поэтому дальнейшие эксперименты по КСС сопротивлением проводили с программируемым изменением сварочного усилия в соответствии с циклограммой, представленной на рис. 5, и оптимизированной формой подготовки кромок, исключая запрессовку воздуха в зоне соединения.

Макроструктура сварного соединения штока с проушиной из сталей 45 и 17ГС, выполненного КСС сопротивлением по схеме 1, представлена на рис. 7, а микроструктура металла в различных участках соединения — на рис. 8–10. Оптической и сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) установлено, что в зоне соединения в различных участках сечения — центральном (рис. 8), среднем (рис. 9) и периферийном (рис. 10), отсутствуют непровары, оксидные пленки, трещины, вызванные образованием закалочных структур. Отсутствие на границе раздела участков с литой и крупнозернистой структурой, характерной для перегретого металла, свидетельствует о том, что процесс кристаллизации металла в зоне соединения происходил в условиях интенсивной сдвиговой деформации при осадке. Структура в зоне

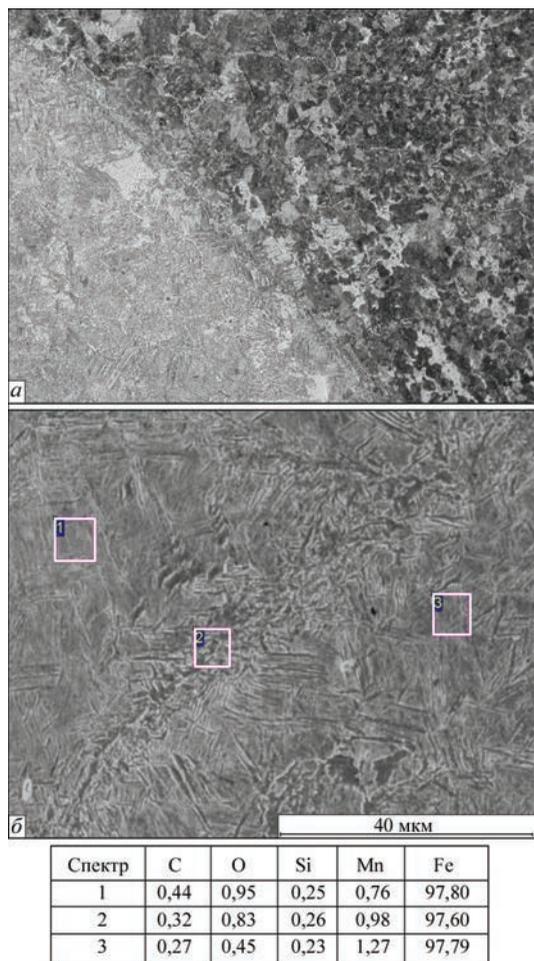


Рис. 9. Микроструктура металла участка II (а, б); а — ×100; состав металла в зоне соединения, СЭМ (б)

соединения и зоне термомеханического влияния — ферритно-перлитная, участков с мартенситной структурой не обнаружено.

Известно, что скорость деформирования оказывает существенное влияние на структуру и свойства металла сварных заготовок: при ее увеличении образуется более мелкозернистая структура в зоне соединения. Это объясняется тем, что процесс рекристаллизации подавляется процессом деформации, сопровождающейся измельчением зерен. Поэтому при способах сварки давлением рекомендуется применить схему всестороннего неравномерного сжатия, которая позволяет управлять объемным напряженным состоянием, характером пластической деформации.

При разработанных оптимальных режимах КСС сопротивлением по схеме 1 деформирование металла происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия и имеет характер вязкого течения (как при экструзии), которое способствует схватыванию свариваемых поверхностей, очищению их от оксидных плен, «залечиванию» микронесплошностей и измельчению структуры. При завершении осадки большая часть металла, нагретого до отключения тока, выдавливается за пре-

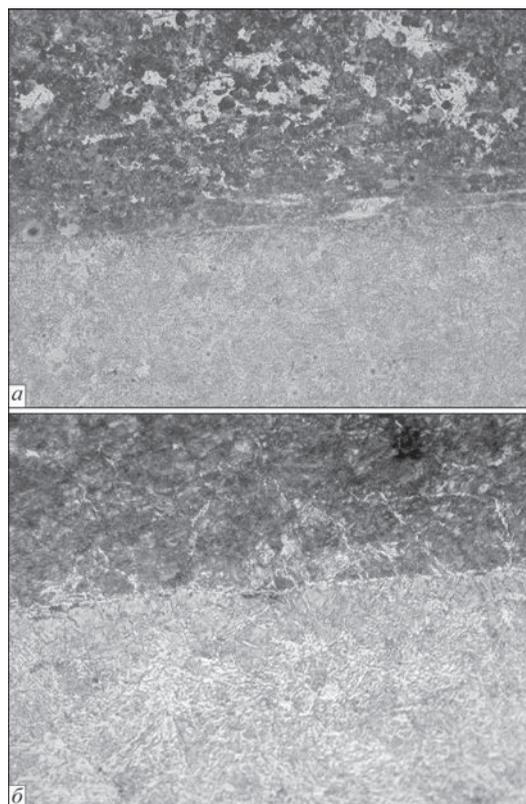


Рис. 10. Микроструктура металла участка III, x100 (а), ×400 (б)

делы свариваемого сечения и в зоне соединения остается металл, который не подвергали нагреву до высоких температур.

Механические испытания сварных штоков на загиб в зоне сварки проводили на гидравлическом прессе с максимальным усилием 100 т. Сварной шток считали качественным при условии разрушения вне зоны сварного соединения. На рис. 11, а представлен сварной шток после испытаний; локализация разрушения — по основному металлу штока. Таким образом, при КСС сопротивлением с оптимальной подготовкой свариваемых кромок и программируемым изменением сварочного усилия на стадии нагрева удается локализовать тепловыделение в зоне сварки, избежать образования дефектов в соединениях штоков в исследуемом диапазоне диаметров и обеспечить высокие механические характеристики сварных изделий.

Сварной шток, выполненный КСС сопротивлением по схеме 2 (см. рис. 3) с использованием КВ из стали 09Г2С с активирующим флюсом, представлен на рис. 11, б. Микроструктура металла в разных участках соединения представлена на рис. 12, 13, распределение микротвердости металла в зоне соединения — на рис. 14. При металлографических исследованиях в зоне соединений не обнаруживаются какие-либо дефекты (трещины, непровары, поры, оксидные пленки, остатки флюса). С целью предотвращения образования закалочных структур при соединении штоков большого диаметра (более 32 мм) проводилась

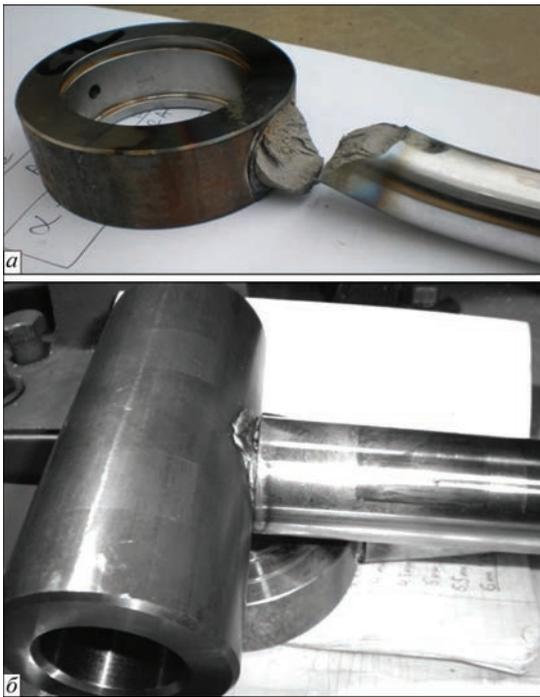


Рис. 11. Сварной шток Ш25, выполненный КСС сопротивлением по схеме 1, после испытаний на загиб (а); шток, выполненный по схеме 2 (б)

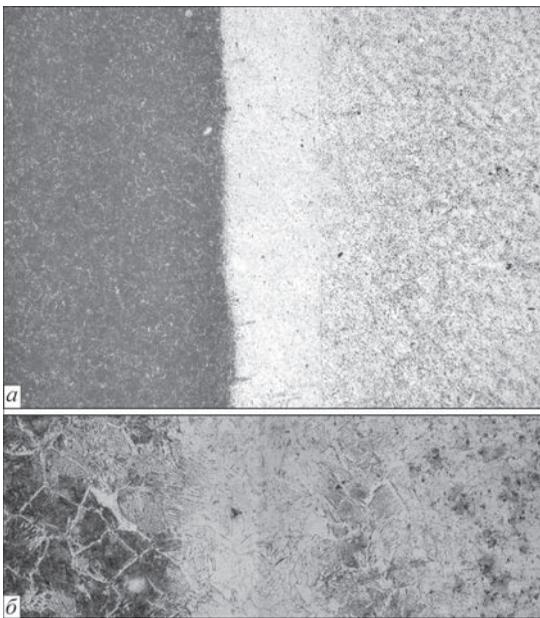


Рис. 12. Микроструктура металла в зоне соединения, выполненного КСС сопротивлением по схеме 2, центр сечения, $\times 50$ (а); $\times 200$ (б)

послесварочная термическая обработка штоков в зажимах сварочной машины путем пропускания импульсов тока, при этом осуществляли пирометрический контроль температуры нагрева.

На основе результатов исследований разработан технология КСС сопротивлением штоков гидроцилиндров из сталей 45 и 17ГС диаметром от 16 до 60 мм. Технология реализована на спроектированной и изготовленной в Институте электросварки им. Е. О. Патона специализированной сварочной ма-

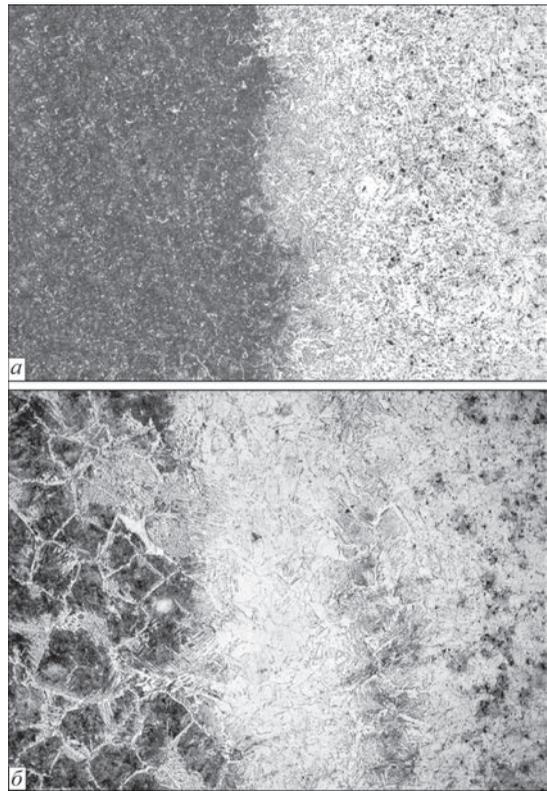


Рис. 13. Микроструктура металла в зоне соединения, выполненного КСС сопротивлением по схеме 2, периферия сечения, $\times 50$ (а); $\times 200$ (б)

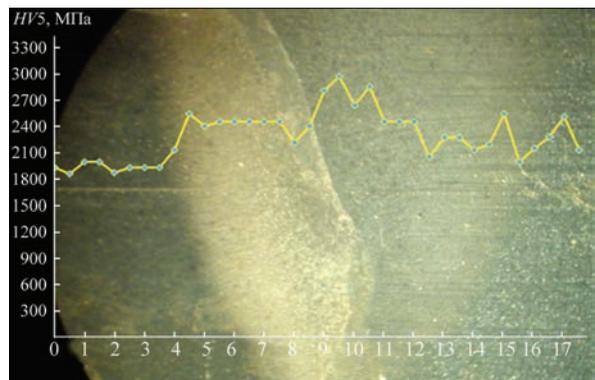


Рис. 14. Распределение микротвердости в зоне сварного соединения после термической обработки в зажимах сварочной машины

шине К1040. Машина обеспечивает усилие сварки от 600 до 7200 кг, сварочный ток от 15 до 65 кА при сварке штоков различных типоразмеров и времени сварки от 0,8 до 3,5 с.

Впервые для сварочных машин такой мощности применен трехфазный преобразователь частоты, который обеспечивает равномерную загрузку фаз. КСС сопротивлением с послесварочной термообработкой в зажимах машины обеспечивает прочность сварного соединения штока и проушины гидроцилиндра — на уровне прочности основного металла штока. Разработаны режимы сварки для 96 вариантов соединений штоков и проушин. В результате экспериментов были оптимизированы параметры предварительной подготовки кромок



Рис. 15. Сварные штоки, выполненные КСС сопротивлением для различных типоразмеров штока и проушины. При разработанной технологии КСС сопротивлением штоков в диапазоне диаметров 16...60 мм обеспечивается качественное формирование соединений без выплесков, с высокими механическими свойствами и высокая точность геометрии сварного изделия — допуск по длине и диаметру не превышает 0,5 мм. Гидроцилиндры со штоками, сваренными по разработанной технологии КСС сопротивлением, успешно прошли сертификационные испытания и поставляются в страны ЕС, Восточной Европы и Иран.

Выводы

При КСС сопротивлением тавровых соединений большого сечения формирование качественных соединений усложняется вследствие асимметрии условий нагрева и деформации, что обуславливает образование дефектов и низких показателей статической и циклической прочности.

Исследован процесс КСС сопротивлением тавровых соединений штоков и проушин гидроцилиндров, в том числе с большим сечением (диаметр заготовок до 60 мм) из сталей 45 и 17ГС. Установлено, что при КСС сопротивлением с оптимальной подготовкой свариваемых кромок и программируемым изменением сварочного усилия на стадии нагрева удается локализовать тепловыделение в зоне сварки штоков в исследуемом диапазоне диаметров, избежать образования дефектов и обеспечить высокие механические характеристики сварных соединений.

Металлографическими исследованиями установлено, что в соединениях отсутствуют непровары, оксидные пленки, трещины, вызванные образованием закалочных структур. Структура металла в зоне соединения и зоне термомеханического влияния — ферритно-перлитная; участков с мартенситной структурой не обнаружено. При механических испытаниях сварных штоков на за-

гиб разрушение происходит по основному металлу штока.

Разработана технология КСС сопротивлением тавровых соединений разнородных сталей с использованием композиционных вставок. Технология КСС сопротивлением штоков гидроцилиндров диаметром 16...60 мм реализована на специализированной сварочной машине K1040, спроектированной и изготовленной в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В ней используется трехфазный преобразователь частоты, который обеспечивает равномерную загрузку фаз. Сварные гидроцилиндры успешно прошли сертификационные испытания.

1. Сахацкий Г. П. Исследование контактной стыковой сварки оплавлением и сопротивлением / Г. П. Сахацкий // Автоматическая сварка. — 1963. — № 10. — С. 26–32.
2. Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка сопротивлением и инерционная сварка трением заготовок концевое металлорежущего инструмента / В. К. Лебедев, И. А. Беспрозванный, Ю. А. Миргород // Автоматическая сварка. — 1979. — № 8. — С. 39–43.
3. Zhang H. Resistance welding fundamentals and applications / Zhang H., Senkara J. — Boca Raton, 2006. — 239 p.
4. Особенности контактной сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминий-никелевых и алюминий-медных фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швец, А. Г. Сахацкий [и др.] // Сварочное производство. — 2007. — № 9. — С. 12–14.
5. Особенности контактной сварки алюминидов титана с использованием нанослойных алюминий-титановых фольг / В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швец, А. Г. Сахацкий [и др.] // Автоматическая сварка. — 2009. — № 3. — С. 19–22.
6. Структура соединений алюминидов титана γ -TiAl при контактной стыковой сварке сопротивлением с использованием промежуточных прослоек / С. И. Кучук-Яценко, И. В. Зяхор, С. В. Чернобай [и др.] // Автоматическая сварка. — 2015. — № 9. — С. 7–14.
7. Зварюваність нових сплавів системи Al–Cr–Fe–Ti, що зміцнені наноквазікристалічними частками / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, В. Є. Федорчук [та ін.] // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. — 2007. — № 30. — С. 55–60.
8. Формирование структуры соединений при контактной стыковой сварке сопротивлением и оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, В. Ф. Загадарчук [и др.] // Автоматическая сварка. — 2004. — № 2. — С. 16–19.
9. Преобразователь частоты и числа фаз для контактной стыковой сварки рельсов / С. И. Кучук-Яценко, П. М. Руденко, В. С. Гавриш [и др.] // Автоматическая сварка. — 2015. — № 7. — С. 41–43.
10. Pat. 8,426,762, B2 US. Method of resistance butt welding using corrugated flux-filled metal inserts / V. S. Kuchuk-Yatsenko, A. A. Nakonechnyi, A. G. Sakhatskiy. — 23, apr., 2013.
11. Song Q. An experimental study determines the electrical contact resistance in resistance welding / Q. Song, W. Zhang, N. Bay // Welding Journal. — 2005. — 84 (5). — P. 73–76.
12. Технология рельефной сварки деталей больших толщин с Т-образными соединениями / В. С. Кучук-Яценко, А. А. Наконечный, В. С. Гавриш [и др.] // Автоматическая сварка. — 2012. — № 8. — С. 45–47.
13. Липа М. Контактная рельефная сварка / М. Липа, Я. Голасек. — К.: Техніка, 1970. — 324 с.
14. Гилевич В. А. Технология и оборудование рельефной сварки / В. А. Гилевич. — Л.: Машиностроение, 1976. — 152 с.

Поступила в редакцию 16.05.2016