

## МАШИНОСТРОЕНИЕ . МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 620.179

**С. В. Болотов, канд. техн. наук, В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф.**

### **КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ И ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПО ОСТАТОЧНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ**

На основе теоретических и экспериментальных исследований остаточных магнитных полей в зоне сварных соединений разработаны методика и оборудование для контроля диаметра литого ядра при контактной точечной сварке и глубины проплавления соединений, выполненных дуговой сваркой. Установлены режимы и информативные параметры контроля. Проверка разработанных методик контроля и оборудования для их реализации проведена на ряде промышленных предприятий.

Большинство существующих методов дефектоскопии ориентировано на обнаружение несплошностей сварных соединений на фоне качественно сваренного металла. Однако существует целый ряд соединений и конструкций, при контроле которых требуется решение нетрадиционной задачи – определение размеров зоны взаимного расплавления деталей на фоне допустимого зазора между ними в месте отсутствия сварки. Например, при контактной сварке в процессе контроля необходимо оценивать диаметр литого ядра сварной точки, который является основным параметром, определяющим прочность и работоспособность соединения. Для угловых швов, выполненных дуговой сваркой, важнейшим показателем качества является глубина взаимного проплавления соединяемых деталей.

Определить эти параметры, используя традиционные методы дефектоскопии, достаточно сложно в связи с большим влиянием на точность и достоверность контроля формы и величины зазора между деталями в месте отсутствия сплавления. Например, для дефектов типа «слипание» зазор обусловлен только толщиной оксидных пленок, что делает практически невозможным идентификацию сплошной зоны проплавления на его фоне существующими способами контроля. По этой причине до сих пор на предприятиях основ-

ным методом контроля соединений при контактной точечной сварке остаются дорогостоящие и неэффективные механические испытания. Подобные проблемы возникают и при контроле угловых, тавровых и прорезных соединений, выполненных дуговой сваркой. Трудность оценки реальной глубины проплавления приводит к тому, что при контроле ограничиваются только замером катетов швов, что не всегда дает правильное представление о работоспособности конструкции, т. к. неизвестно, насколько в глубь металла распространяется зона взаимного расплавления деталей. Поэтому при конструировании в проект закладываются завышенные значения катетов, что приводит к неоправданным материальным и трудовым затратам.

В связи с этим разработана новая неразрушающая методика контроля, основанная на других по сравнению с традиционной дефектоскопией принципах определения параметров проплавления свариваемых деталей, является актуальной задачей.

Нами проведен анализ причин уменьшения зоны проплавления при контактной точечной и дуговой сварке. В конечном итоге все они вызваны уменьшением количества тепла, идущего на формирование сварного соединения. Это приводит к уменьшению тем-

пературы в отдельных точках в области сварки. Контроль параметров проплавления удобно вести после её осуществления. Нами предложено для этой цели использовать остаточную индукцию. Известно, что с повышением температуры она уменьшается, что связано с нарушением ориентированного расположения спиновых моментов электронов, которые обуславливают ферромагнитные свойства вещества. При достижении точки Кюри дезориентирующее действие теплового движения становится преобладающим над силами обменного взаимодействия и тело перестаёт быть ферромагнитным. Для сталей, содержащих до 0,6 % углерода, потеря ферромагнитных свойств происходит при температуре 768 °С.

Если намагничивать область соединения до сварки или во время её осуществления, то она будет размагничиваться пропорционально действию температуры от источника нагрева, а различные участки соединения будут иметь остаточную индукцию, связанную с температурой.

Для проведения теоретических исследований разработана методика конечно-элементного расчёта тепловых и магнитных полей в зоне сварных соединений различных типов с использованием пакета программ COSMOS/M [1].

Расчётные модели теплового расчёта основывались на использовании четырёх- и восьмиузловых упругих элементов, учитывалась нелинейность свойств материала изделия и конвективного коэффициента теплоотдачи при изменении температуры. Расчётные модели магнитного расчёта основывались на использовании четырёхузловых магнитных элементов. Источниками магнитного поля при моделировании намагничивания стыковых и тавровых соединений перед дуговой сваркой являлись применяемые в магнитном контроле П-образные приставные электромагниты. Для моделирования намагничивания области соединения перед приваркой бобышки к основанию использовался соленоид. Моделирование намагничивания области контактной точечной сварки осу-

ществлялось соленоидом, расположенным на электрододержателе контактной машины.

Результатами магнитного расчёта являются картины распределения индукции в процессе намагничивания. COSMOS/M не позволяет осуществить переход к остаточной индукции и связать результаты теплового и магнитного расчётов. Для ликвидации перечисленных недостатков, в целях создания обобщённой магнитно-тепловой модели, нами разработана программа на языке Delphi, работающая в совокупности со средой COSMOS/M.

На основании информации о материале и размерах свариваемых деталей, намагничивающих устройств, режимах намагничивания и сварки формируются текстовые файлы, содержащие команды для осуществления теплового и магнитного расчётов. Затем COSMOS/M осуществляет расчёт теплового поля при сварке и индукции в области соединения в процессе намагничивания. Следующим этапом является осуществляемый программой переход к остаточной индукции для каждого узла модели в момент отключения намагничивающего устройства по следующей зависимости:

$$Br(H_m) = \frac{B_s(H_m)}{\pi} \left[ 2 \operatorname{arctg} \frac{H_c^\infty}{H_0} - \left( \operatorname{arctg} \frac{H_c^\infty + H_m}{H_0} + \operatorname{arctg} \frac{H_c^\infty - H_m}{H_0} \right) \right], \quad (1)$$

где  $H_c^\infty$  – коэрцитивная сила предельного цикла петли гистерезиса;  $B_s(H_m)$  – величина индукции на кривой намагничивания материала при напряжённости поля  $H_m$ ;  $H_0$  – параметр, имеющий размерность магнитного поля, определяемый по формуле

$$H_0 = \frac{H_c^\infty}{\operatorname{tg} \left( \frac{B_r^\infty \pi}{B_s^\infty 2} \right)}, \quad (2)$$

где  $B_s^\infty, B_r^\infty$  – индукция насыщения и остаточная индукция по предельной петле гистерезиса.

Далее производится расчет остаточной индукции в результате наложения теплового поля при сварке по формуле

$$Br = \sqrt{k1 - (k2 \cdot T)^2}, \quad (3)$$

где  $k1, k2$  – коэффициенты, зависящие от степени начального намагничивания;  $T$  – температура металла, °С.

Для возможности программного совмещения результатов теплового и электромагнитного расчётов конечно-элементные сетки моделей имели одинаковую структуру.

Проведенные расчёты остаточных магнитных полей при контактной точечной сварке показали, что намагничивание зоны соединения необходимо начинать в момент отключения сварочного тока, когда исключается его влияние на степень конечного намагничивания. При этом величина остаточной индукции будет определяться степенью разогрева области сварки. При нарушении параметров режима сварки происходит изменение диаметра литого ядра точки. В случае его уменьшения в области контакта «электрод–деталь» наблюдается заметное увеличение уровня остаточного магнитного поля (рис. 1).

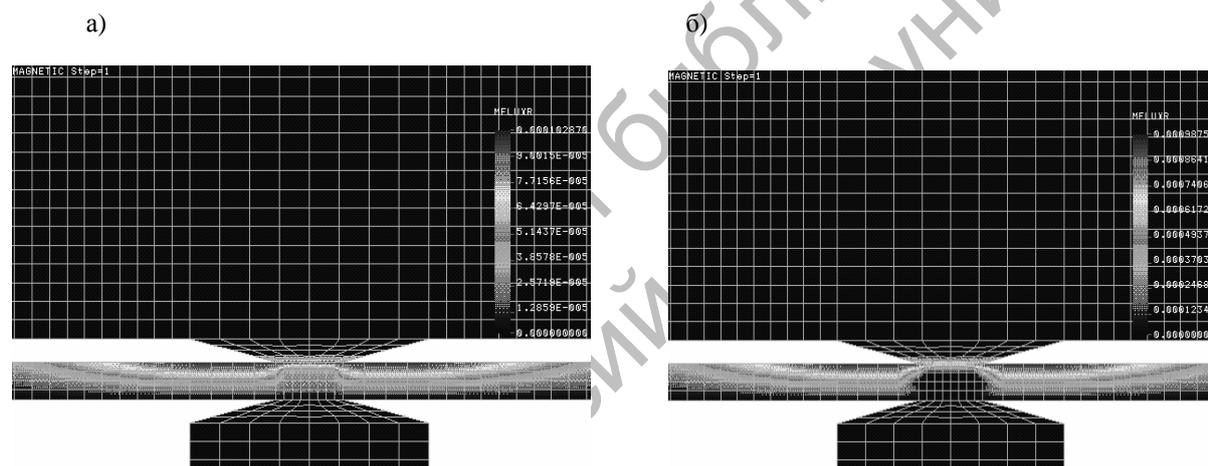


Рис. 1. Картина распределения остаточной индукции при нарушении параметров режима контактной точечной сварки: а – непровар; б – качественная точка

Результаты расчёта остаточной индукции в зоне предварительно намагниченных соединений, выполненных дуговой сваркой, указывают на возникновение размагниченной зоны, прилегающей к сварному шву. Причём её размеры могут достигать 10–15 мм. Нарушение параметров режима сварки приводит к уменьшению глубины проплавления свариваемых деталей и возникновению участка с повышенной величиной остаточной индукции на определённом расстоянии в направлении, перпендикулярном сварному шву. При

этом происходит уменьшение размагниченной зоны в области сварного соединения на данных участках (рис. 2).

Трансформированное при нагреве остаточное магнитное поле на поверхности участков соединений из сталей, содержащих до 0,6 % углерода, нагретых при сварке до температур 450–768 °С, отражает характер распространения теплового поля, что создаёт возможность определять размеры проплавления сварных соединений по остаточной индукции в зоне сварки.

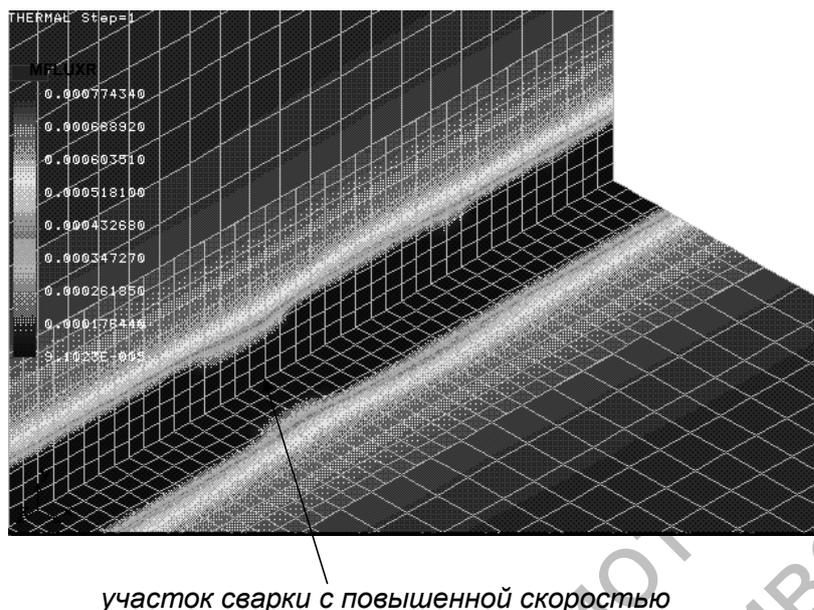


Рис. 2. Картина распределения индукции при изменении скорости дуговой сварки

Результаты теоретических исследований показали, что в качестве информативного параметра, характеризующего диаметр литого ядра при контактной точечной сварке, целесообразно использовать изменение уровня нормальной составляющей остаточной индукции в центре контакта «электрод–деталь» по сравнению с уровнем остаточной индукции намагниченного изделия без протекания сварочного тока. В качестве информативного параметра, характеризующего глубину проплавления при дуговой сварке, целесообразно использовать размер размагниченной зоны, прилегающей к сварному шву. Связь между указанными параметрами носит линейный характер [2].

Экспериментальные исследования параметров магнитного поля в зоне контактной точечной сварки проводили на пластинах из Ст3, стали 08 пс толщиной от 1 до 4 мм. Сварку вели на контактной точечной машине переменного тока типа МТ–1617. Для возможности локального измерения индукции на поверхности изделия, а также в зазоре свариваемых деталей использовался магнитометр на основе преобразователя Холла.

Результаты экспериментов показали, что распределение нормальной составляющей остаточной индукции, в отличие от тангенциальной, носит равномерный характер в области контакта «электрод–деталь». Причём уровни остаточной индукции для качественного и дефектного сварных соединений отличаются более чем в 3 раза (рис. 3).

Выявлено, что для диапазона толщин свариваемых деталей 1–4 мм оптимальным временем намагничивания является время 0,04–0,06 с при величине намагничивающего поля 5 кА/м у поверхности изделия.

Установлена линейная корреляционная связь между изменением уровня остаточной индукции в центре контакта «электрод–деталь» и диаметром литого ядра точек деталей разных толщин для различного времени намагничивания. Коэффициенты корреляции для данных зависимостей не ниже 0,92.

На распределение остаточной индукции в центре контакта электрод–деталь существенное влияние могут оказывать параметры намагничивающего контура. Это связано с инерционно-

стью спада тока в намагничивающем соленоиде. С помощью разработанной нами программы в Excel построены зависимости постоянной времени и напряжённости поля от числа витков соленоида для различ-

ных диаметров обмоточного провода, позволяющие определять оптимальные параметры намагничивающего устройства.

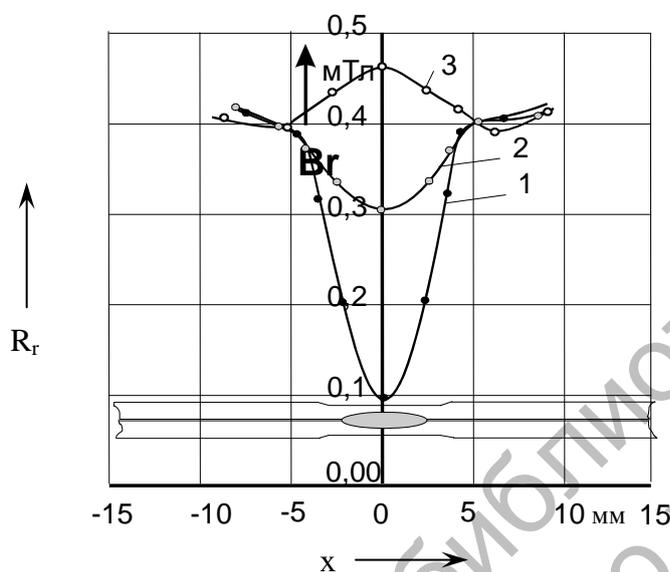


Рис. 3. Распределение остаточной индукции в зоне точечного сварного соединения: 1 – качественное сварное соединение; 2 – отсутствие литого ядра; 3 – намагничивание без протекания тока

Анализ результатов измерений показал, что наибольшая чувствительность к определению размеров зоны взаимного расплавления свариваемых деталей обеспечивается для толщин  $2 + 2$  мм. Для толщин деталей свыше 3 мм чувствительность к выявлению непровара значительно снижается.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что для точечных соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной 1–4 мм глубина вмятин от электродов и зазор между свариваемыми деталями не оказывают существенного влияния на достоверность контроля диаметра литого ядра. При колебании глубины вмятины от 0 до 0,6 мм изменение среднеквадратичного отклонения диаметра литого ядра не превышает 0,11 мм, а при колебании зазора между свариваемыми деталями от 0 до 0,4 мм – не выше 0,19 мм. Для исключения возможности перемагничивания со-

седних точек при контроле расстояние между ними должно превышать диаметр намагничивающей катушки не менее чем в 1,5 раза. Краевой эффект не будет проявляться при расстоянии от края образца до сварной точки более 45 мм.

Для исследования магнитных полей в зоне соединений, выполненных дуговой сваркой, использовались Ст3 и сталь 08 пс толщиной 3, 4, 6 мм. Прихватку и сварку производили с помощью полуавтомата unMIG-400 в среде защитного газа. Зазор устанавливали в соответствии с ГОСТ 14771-76. Глубина проплавления регулировалась изменением скорости сварки и величины сварочного тока.

Установлено, что во избежание возникновения явления «магнитного дутья» при дуговой сварке предварительно намагниченных до насыщения деталей (величина поля 3–5 кА/м) свар-

ку рекомендуется начинать в местах прихваток.

Исследования топографии остаточных магнитных полей в зоне стыковых и тавровых соединений, выполненных дуговой сваркой, указывают на существование зоны с пониженным значением тангенциальной составляющей остаточной индукции в зоне термического влияния. Величина размагниченного участка, прилегающего к сварному шву, изменяется в зависимо-

сти от глубины проплавления (рис. 4). Размагниченными считались те участки, уровень индукции на поверхности которых не превышает 20 мТл, что связано с учётом намагничивающего поля Земли и поля от намагничивающего поля Земли и поля от намагниченных участков соединения. Величина намагничивающего поля должна быть достаточной для намагничивания металла до насыщения и составлять не менее 5 кА/м.

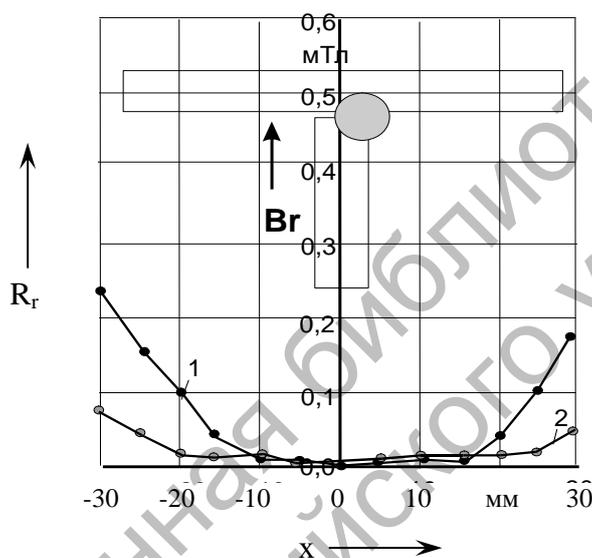


Рис. 4. Распределение остаточной индукции по поверхности свариваемых деталей толщиной 4 мм: 1 – глубина проплавления  $h = 3$  мм; 2 –  $h = 3,5$  мм

Размеры размагниченной зоны, определённые замером, превосходят значения, полученные в результате расчёта, что связано с неучтённым влиянием магнитного поля сварочного тока. Установлено, что при сварке стыковых соединений целесообразно токоподвод осуществлять на одну из свариваемых пластин, а измерение остаточной индукции производить на поверхности другой. При сварке таврового соединения токоподвод целесообразно осуществлять к стенке, а измерять остаточную индукцию на поверхности полки.

Установлена линейная корреляционная связь между величиной размагниченной зоны, прилегающей к сварному

шву и глубиной проплавления для различных толщин свариваемых деталей. Коэффициенты корреляции для данных зависимостей не ниже 0,88.

Показано, что с ростом толщины свариваемых деталей относительная погрешность измерения глубины проплавления соединений, выполненных дуговой сваркой уменьшается. Зазор между свариваемыми деталями не оказывает существенного влияния на достоверность контроля. При колебании от 0 до 1 мм зазора между деталями толщиной 3, 4, 6 мм изменение относительной погрешности определения глубины проплавления составляет 0,4; 1,2; 1,6 % со-

ответственно.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены режимы контроля и основные параметры оборудования для его реализации.

Для осуществления магнитно-теплового контроля качества контактной точечной сварки деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной 1–4 мм разработана микропроцессорная установка УКТС–01, позволяющая: намагничивать область сварной точки до состояния технического насыщения с учётом возможного зазора между намагничивающим устройством и изделием, производить после окончания сварки включение намагничивающего устройства с регулируемой величиной и длительностью намагничивающего импульса, осуществлять измерение уровня остаточной индукции в центре контакта «электрод–деталь» и по заложенным корреляционным зависимостям для разных толщин и материала свариваемых деталей производить определение диаметра литого ядра точки [3].

Методика контроля качества контактной точечной сварки заключается в следующем. На установке УКТС–01 осуществляется задание толщины и материала свариваемых деталей, режимов намагничивания. Далее расположением преобразователя Холла на поверхности изделия производится фиксация уровня остаточной индукции при намагничивании без протекания сварочного тока. Установка автоматически намагничивает область соединения при сварке каждой точки, фиксирует уровень остаточной индукции в центре контакта «электрод–деталь» при расположении там преобразователя Холла с индикацией диаметра литого ядра [4, 5].

Для контроля глубины проплавления сварных соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной от 3 мм разработано устройство, позволяющее производить перемещение преобразователя Холла по поверхности сварного соединения в целях измерения уровня остаточной индукции в области, прилегающей к сварному шву, и

осуществлять индикацию отклонения параметров проплавления соединения от номинальных.

Методика контроля глубины проплавления соединений, выполненных дуговой сваркой, заключается в следующем. После прихватки свариваемых деталей осуществляется их намагничивание П-образным электромагнитом в направлении, перпендикулярном сварному шву полем не менее 5 кА/м. Сварку необходимо начинать в местах прихваток с токоподводом на деталь, на поверхности которой не будет производиться измерение остаточной индукции [3]. Далее, в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей, на разработанном приспособлении производится установка преобразователя Холла на определённом расстоянии от оси сварного шва и задание пределов индукции, соответствующих нижней и верхней границам проплавления. При перемещении преобразователя вдоль сварного шва разработанное устройство осуществляет звуковую и световую индикацию в случае выхода размеров проплавления из нормированных пределов.

Проверка разработанных методик контроля и оборудования для их реализации производилась на ряде промышленных предприятий.

На РУП «Могилевтрансмаш» были проведены исследования разработанного способа контроля глубины проплавления соединений при приварке бобышек, изготавливаемых из Ст3, наружным диаметром 25 мм и высотой 18 мм, служащих для крепления трубопровода гидропривода к нижней раме автокрана. В результате испытаний установлено, что при образовании непроваров на расстоянии 7 мм от торца бобышки наблюдается повышение уровня остаточной индукции до 0,16 мТл; при образовании прожога уровень остаточной индукции ниже 0,1 мТл. Корреляционная связь между остаточной индукцией и глубиной проплавления соединения приведена на рис. 5. Коэффициент

корреляции  $R^2 = 0,896$ . Регрессионная зависимость имеет вид:

$$Br = 0,1902 - 0,0216 \cdot H. \quad (4)$$

На РУП «Могилевский автомобильный завод им. С. М. Кирова» производились испытания установки УКТС-01 при контроле диаметра литого ядра точек элементов кабины тягачей МоАЗ. Готовые соединения разрушались с целью оценки реального размера точек. Оценка досто-

верности магнитно-теплового контроля производили по альтернативному признаку. Установлено, что достоверность контроля при определении непроваров составляет 93 % при ошибке в определении диаметра литого ядра  $\pm 10$  %. Трудоёмкость магнитно-теплового контроля намного меньше использовавшихся на предприятии механических испытаний.

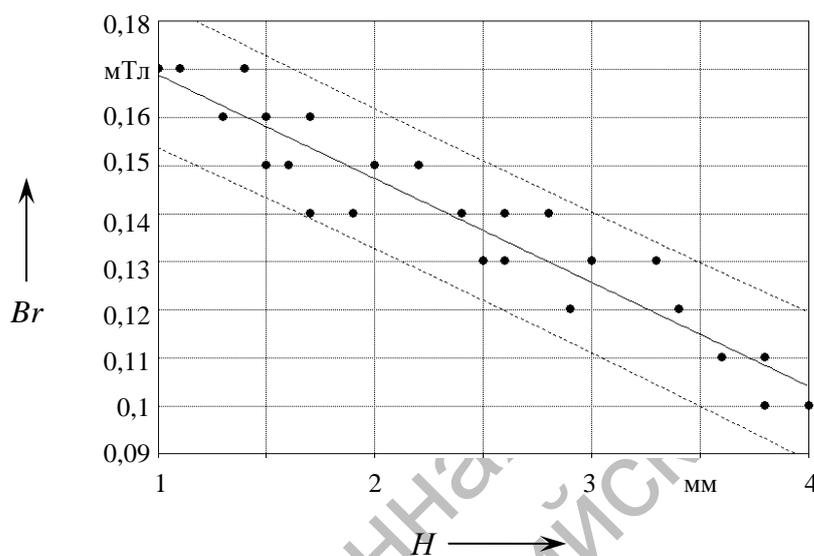


Рис. 5. Корреляционная связь между величиной остаточной индукции на расстоянии 7 мм от торца бобышки и глубиной проплавления соединения

### Заключение

1. Установлено, что в качестве информативного параметра, характеризующего качество точечного сварного соединения, целесообразно использовать величину нормальной составляющей остаточной индукции в центре контакта «электрод-деталь», а соединения, выполненного дуговой сваркой, – величину размагниченной зоны, прилегающей к сварному шву.

2. Показано, что намагничивание точечных соединений соленоидом перпендикулярно поверхности изделия необходимо осуществлять в момент отключения сварочного тока полем 5 кА/м длительностью 0,04–0,06 с. Намагничивание соединений

перед дуговой сваркой необходимо производить П-образным электромагнитом в направлении, перпендикулярном оси сварного шва полем не менее 5 кА/м. Установлена линейная связь между параметрами проплавления сварных соединений и остаточной индукцией в зоне сварки с коэффициентами корреляции не ниже 0,88.

3. Разработаны и апробированы на ряде промышленных предприятий методики контроля диаметра литого ядра при контактной точечной сварке и глубины проплавления соединений, выполненных дуговой сваркой. Показано, что зазор между свариваемыми

детальями не оказывает существенного влияния на относительную погрешность определения параметров проплавления. Достоверность разработанного способа контроля составляет 93 %, ошибка в определении диаметра литого ядра не превышает 10 %, производительность значительно выше механических испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Болотов, С. В.** Расчёт остаточных магнитных полей при магнитно-тепловом контроле / С. В. Болотов // Сварка и родственные технологии. – 2002. – № 5. – С. 99–101.
2. **Куликов, В. П.** Магнитно-тепловой метод контроля сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой / В. П. Куликов, С. В.

Болотов // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 16–20.

3. **Куликов, В. П.** Магнитно-тепловой метод контроля геометрических характеристик проплавления соединений, выполненных контактной и дуговой сваркой / В. П. Куликов, С. В. Болотов // Дефектоскопия. – 2004. – № 4. – С. 73–85.

4. **Kulikov, V. P.** Magnetic-thermal method of inspection of the quality of resistance spot welded joints / V. P. Kulikov, S. V. Bolotov // Welding International. – 2004. – Vol. 18, № 2. – P. 135–138.

5. **Болотов, С. В.** Микропроцессорная установка для намагничивания зоны сварки при магнитно-тепловом контроле точечных соединений / С. В. Болотов, Е. Н. Якубов // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГТУ, 2003. – С. 244.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 17.05.2007

**S. V. Bolotov, V. P. Kulikov**  
**Melting depth parameters control in spot and arc welding on remaining induction in the join zone**  
Belarusian-Russian University

On the basis of theoretical and experimental researches of residual magnetic fields in a zone of welded connections the technique and the equipment have been developed for the control of diameter of a cast kernel over contact spot welding and depth of melting of the connections executed by arc welding. Modes and informative parameters of the control have been established. Check of the developed control techniques and the equipment for their realization have been lead on a number of the industrial enterprises.