

## МАГНИТНО-ТЕПЛОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПЛАВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ И ДУГОВОЙ СВАРКОЙ

В.П. Куликов, С.В. Болотов

На основе исследований взаимодействия тепловых и электромагнитных полей при сварке стали Ст 3 предложен новый подход в оценке качества соединений, выполненных контактной точечной и дуговой сваркой. Свариваемые контактной точечной сваркой детали намагничиваются соленоидом непосредственно после отключения сварочного тока. По изменению уровня нормальной составляющей остаточной индукции в центре контактного пятна электрода оценивается диаметр литого ядра. Свариваемые дуговой сваркой детали намагничиваются до сварки. По величине зоны размагничивания, непосредственно прилегающей к сварному шву, судят о его глубине проплавления.

При контактной точечной сварке основным параметром, характеризующим прочность сварного соединения, является диаметр литого ядра точки в зоне взаимного расплавления свариваемых деталей (рис. 1а). Диаметр точки — величина расчетная и ее уменьшение ниже нормативного значения называется непроваром. Предельным и наиболее опасным видом непровара считается так называемое “слипание”, когда взаимное расплавление свариваемых деталей вообще отсутствует, а соединение произошло в твердой фазе по ограниченной площади (рис. 1б). Небольшие зоны схватывания (участки металлической связи) наблюдаются в районе соприкосновения отдельных микровыступов, где условия развития пластической деформации были наиболее благоприятными. Такое соединение по внешнему виду часто не отличается от хорошо сваренной точки, может обладать достаточной прочностью на срез, но быстро разрушаться при действии отрывающих или переменных нагрузок.

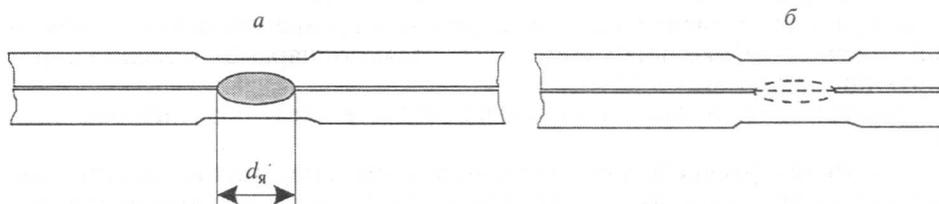


Рис. 1. Точечное сварное соединение:  
а — с образованием литого ядра; б — “слипание”.

Выявление непроваров, как в виде “слипания”, так и в виде уменьшения диаметра сварной точки, является важнейшей задачей дефектоскопии контактной точечной сварки, которая в настоящее время не нашла удовлетворительного решения.

Похожая проблема часто возникает и при дуговой сварке, когда необходимо определить глубину проплавления сварного шва (рис. 2). Особенно актуальна эта задача при сварке тавровых соединений, где величина непровара, или как его иногда называют “технологического зазора”, плохо определяется известными разрушающими методами.

Использование традиционных методов магнитного контроля для обнаружения параметров проплавления при контактной и дуговой сварке весьма ограничено, вследствие большого количества помех и недостаточной чувствительности при выявлении “слипаний” [1, 2].

Авторами предложен новый метод контроля параметров проплавления сварных швов, получивший название магнитно-теплового [3]. Сущность его состоит в следующем. Участок конструкции, подлежащий сварке, предварительно намагничивается постоянным магнитным полем определенной величины и направления, а затем производится сварка. Под действием теплового поля от источника сварочного нагрева металл размагничивается. После сварки характер распределения остаточной индукции в общем случае будет отражать характер распространения теплового поля в пределах температур ниже точки Кюри. Так как непровар в сварном соединении практически всегда связан с недостаточным разогревом соответствующей зоны металла, по распределению полей остаточной индукции можно определить геометрические параметры зоны проплавления сварного соединения.

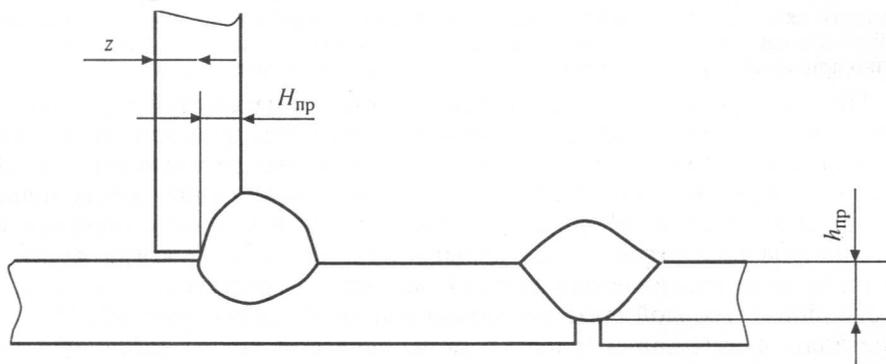


Рис. 2. Характеристики проплавления соединений, выполненных дуговой сваркой.

Исследования предлагаемого способа магнитно-теплового контроля проводили расчетным и экспериментальным путем.

В ходе экспериментальных исследований применительно к контактной точечной сварке необходимо было выявить параметр, тесно коррелирующий с диаметром литого ядра.

Экспериментальные исследования велись в следующих направлениях:

1) изучение распределения тангенциальной и нормальной составляющих остаточной индукции в зоне точечного сварного соединения при намагничивании изделия сварочным током и корреляция ее с качеством точки;

2) изучение распределения тангенциальной и нормальной составляющих остаточной индукции в зоне точечного сварного соединения при намагничивании изделия специальным намагничивающим устройством при различных диаметрах литого ядра.

Изучение необходимых параметров магнитного поля проводили на материале из стали Ст 3 толщиной от 1 до 2 мм. Листовую сталь толщиной 1, 1,5, 2 мм разрезали на равные прямоугольные или квадратные части размером в пределах 7; 8; 9 на 7; 8; 9 см. В случае ржавых образцов производили их зачистку. На наждаке очищали места под сварку от окалины, если имелась таковая. Для моделирования слипания или уменьшения диаметра литого ядра ржавчина с образцов не снималась. Процесс размагничивания в данном методе контроля отсутствует, потому что центр литого ядра нагревается выше точки Кюри (768 °С).

Сварку вели на контактной точечной машине переменного тока типа МТ-1617 с применением медных электродов марки М1 диаметром 12—

20 мм с конической рабочей поверхностью. Сварку проводили на режимах, рекомендуемых для данной толщины свариваемых образцов из данного материала. Регулировка силы сварочного тока осуществлялась плавно-ступенчатым способом. Ступенчатая регулировка производилась переключением ступеней сварочного трансформатора и плавная (в пределах одной ступени) — посредством регулятора цикла сварки РКС-801. На нем же устанавливалась длительность всех временных импульсов и, в частности, времени сварки.

Намагничивание области контактной точечной сварки осуществлялось с помощью установки, функциональная схема которой представлена на рис. 3.

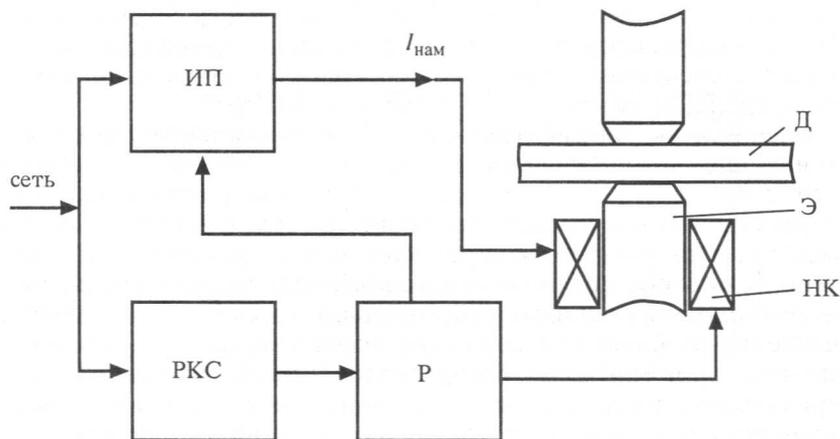


Рис. 3. Функциональная схема намагничивающей установки.

Намагничивающая катушка *НК* установлена на нижнем электроде контактной машины *Э*. Намагничивание детали *Д* осуществляется при прохождении тока намагничивания  $I_{\text{нам}}$  по виткам *НК*. Питание намагничивающей катушки осуществляется источником питания *ИП*. Включение *ИП* производит электромагнитное реле *Р*, выдержка времени срабатывания которого регулируется регулятором контактной сварки *РКС*. *ИП* и *РКС* запитываются от сети 220 В, 50 Гц.

Измерение остаточной индукции на поверхности свариваемых образцов производили с помощью специально разработанного магнитометра на основе датчика Холла (ППХ), обеспечивающего высокую точность и локальность измерений. Разрушение образцов осуществляли разрывом или срезом одной детали относительно другой. Оценку качества сварного соединения производили внешним осмотром и замером диаметра литого ядра (если нет слипания).

Для проведения исследований применительно к дуговой сварке использовали образцы из стали Ст 3 толщиной 3, 4, 6 мм с размерами 100·100, 100·200 мм. Прихватку производили с помощью полуавтомата в среде защитного газа. Изделия подготавливали для сварки в стык и тавр. Зазор устанавливали в соответствии с ГОСТ 14771—76. Намагничивание прихваченных образцов осуществляли на установке для намагничивания с помощью П-образного электромагнита.

Сварку вели с использованием полуавтомата в среде углекислого газа на режимах, рекомендованных для используемых толщин свариваемых образцов. Глубину проплавления изменяли скоростью сварки и величиной сварочного тока.

Измерение остаточной индукции производили с помощью разработанного магнитометра и устройства для крепления датчика Холла.

Известно, что направление силовых линий в любой точке на поверхности сварного соединения совпадает с направлением тангенциальной составляющей магнитного поля. Поэтому, точно определив направление данной величины, можно найти и направление силовых линий. Данное направление определяли следующим образом. В исследуемую точку сварного изделия устанавливали преобразователь Холла и, вращая его или изделие, определяли такое положение, при котором прибор показывал максимальное положительное значение относительно нуля. При этом направление магнитной оси преобразователя было известно. Проведя вектор параллельный данной оси, определяли направление тангенциальной составляющей в искомой точке поверхности сварного соединения. Полученный вектор является касательным к силовой линии магнитного поля в исследуемой точке. Соединяя данные точки кривыми, получаем распределение силовых линий магнитного поля.

Проведенные экспериментальные исследования распределения остаточной индукции в зоне точечного сварного соединения при намагничивании от сварочного тока показали, что данное распределение носит иной характер, чем предполагалось теоретически. Согласно теории, при прохождении сварочного тока через свариваемое изделие возникает магнитное поле, которое после сварки по поверхности распределяется циркулярными силовыми линиями относительно сварной точки. Однако, это распределение не было подтверждено экспериментально, а было установлено некоторое хаотичное распределение силовых линий. Причем части циркулярного распределения явно выражены в направлениях, перпендикулярных осям консолей контактной сварочной машины, с углом расхождения  $60\text{—}90^\circ$ , а в совпадающих направлениях распределение силовых линий хаотично.

Данное обстоятельство объясняется действием “паразитных” магнитных полей, возникших при прохождении сварочного тока. Это связано с расположением элементов сварочного контура контактной машины (консолей, гибких и жестких шин), как известно, образующих наиболее сильные магнитные поля в непосредственной близости от свариваемого изделия. При этом происходит суммирование магнитного поля, возникшего при прохождении сварочного тока через детали, и различно направленного влияния магнитных полей от сварочного контура контактной машины. Этим и объясняется искривление и изменение направления силовых линий магнитного поля на поверхности сварного изделия. Снятые топографии остаточных магнитных полей в зоне сварных точек говорят о возможной корреляции между величиной тангенциальной составляющей остаточной индукции на некотором расстоянии от центра сварной точки (в направлении, перпендикулярном осям консолей сварочной машины) и диаметром литого ядра.

Однако создание способа контроля диаметра литого ядра точки по тангенциальной составляющей остаточной индукции имеет ряд недостатков:

- 1) влияние ориентации преобразователя на точность измерения;
- 2) необходимость оптимизации расстояния от центра сварной точки до области измерения остаточной индукции с существенно различающимися значениями для дефектного и качественного сварного соединения;
- 3) недостаточно высокий диапазон варьирования величины остаточной индукции для качественного сварного соединения.

При расположении оси преобразователя перпендикулярно поверхности изделия его показания не зависят от угла поворота вокруг этой оси.

Однако проведенные эксперименты показали, что распределение нормальной составляющей остаточной индукции в зоне сварной точки при намагничивании от сварочного тока носит случайный характер и не прослеживается четкой корреляционной связи с диаметром литого ядра сварного соединения. Это обстоятельство ведет к необходимости двигаться в другом направлении, то есть попытаться избежать влияния сварочного тока на распределение остаточной индукции в зоне точечного сварного соединения.

Экспериментальные исследования по данной проблеме велись в направлении изучения распределения тангенциальной и нормальной составляющих на поверхности пластины при намагничивании ее соленоидом, закрепленном на электрододержателе сварочной машины.

Результаты экспериментов показали, что распределение нормальной составляющей остаточной индукции, в отличие от тангенциальной составляющей, носит равномерный характер в окрестности области контакта электродов. Уровни остаточной индукции в центре сварной точки имеют значительные отличия для качественного и дефектного сварного соединения. Таким образом в качестве информативного параметра качества точечного сварного соединения было принято значение нормальной составляющей остаточной индукции в центре контактного пятна электрода.

Исследование влияния времени включения намагничивающего устройства на характер распределения остаточного магнитного поля дало следующие результаты:

1) при включении намагничивающего устройства до и во время сварки распределение остаточной индукции носит аналогичный характер распределению индукции при намагничивании только от сварочного тока;

2) при включении намагничивающего устройства (создаваемое магнитное поле до 10 кА/м у поверхности изделия) после сварки происходит полное перемагничивание зоны сварного соединения. Таким образом исключается влияние сварочного тока на распределение остаточного магнитного поля;

3) распределение остаточной индукции зависит только от времени отключения намагничивающего устройства. Следовательно, в целях экономии электроэнергии, целесообразно производить его включение сразу после выключения сварочного тока.

Далее были проведены эксперименты по измерению остаточной индукции для сварных соединений с разным временем намагничивания и имеющих различные диаметры литого ядра точки — основного браковочного признака точечного соединения.

Проведенные эксперименты показали, что из-за инерционности источника питания и срабатывания реле, не удастся получить тесной корреляционной связи между величиной остаточной индукции и диаметром литого ядра точки при времени намагничивания до 0,04 с. С увеличением времени намагничивания уменьшается крутизна характеристики  $\Delta B_r = f(d_{\text{я}})$ , что снижает точность определения диаметра литого ядра. Выявлено, что оптимальным временем намагничивания является время 0,04—0,06 с.

Намагничивание свариваемых образцов перед дуговой сваркой осуществлялось по схемам приведенным на рис. 4. Ток намагничивания 15 А обеспечивает намагничивание материала до насыщения.

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 внешней поверхности полки. Этим самым устраняется влияние сварочного тока на результаты контроля.

Анализ снятых зависимостей распределения тангенциальной составляющей остаточной индукции в зоне сварного соединения показал, что в области, непосредственно прилегающей к сварному шву, индукция на поверхности практически равна нулю, а затем происходит ее плавный рост, причем величина зоны размагничивания зависит от режимов сварки и может использоваться в качестве информативного параметра при оценке качества соединения, выполненного дуговой сваркой.

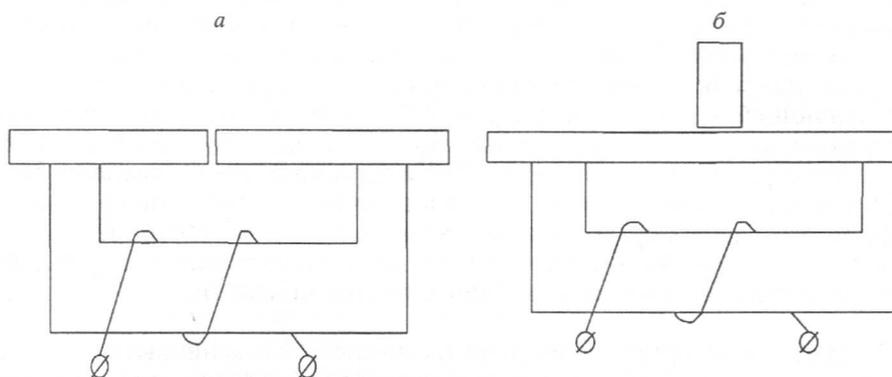


Рис. 4. Схемы намагничивания деталей перед дуговой сваркой:  
а — стыковое соединение, б — тавровое соединение.

Проведенные теоретические исследования применительно к контактной точечной сварке были связаны с оптимизацией режимов намагничивания при контактной точечной сварке и получения зависимостей между величиной остаточной индукции на поверхности свариваемых деталей и диаметром литого ядра точки для различного времени намагничивания.

В области дуговой сварки необходимо было исследовать влияние режимов сварки на глубину проплавления и получить зависимости между величиной зоны размагничивания на поверхности свариваемых деталей и глубиной проплавления для стыковых и тавровых сварных соединений.

Известно, что наиболее прогрессивным программным обеспечением, позволяющим осуществлять динамические тепловые и электромагнитные расчеты, является COSMOS/M. Наряду с множеством его достоинств хотелось бы выделить и ряд недостатков:

- 1) сложность воссоздания каждой новой модели при незначительном изменении режимов сварки и намагничивания, размеров деталей;
- 2) невозможность получить картины распределения остаточной индукции;
- 3) невозможность осуществить связь теплового и электромагнитного расчетов.

Для ликвидации данных недостатков среды COSMOS/M были разработаны специальные программы на языке Turbo Pascal и методика расчета.

Алгоритм расчета остаточной индукции до и после сварки представлен на рис. 5.

На основании информации о размерах свариваемых деталей, намагничивающих устройств, режимов намагничивания и сварки формируются командные файлы теплового и электромагнитного расчета. Под командным файлом подразумевается набор команд среды COSMOS/M, ис-

пользуемых для построения модели. Далее осуществляется тепловой и электромагнитный расчеты в среде COSMOS/M. Результатами расчетов являются распределения температур при сварке (рис. 6а, б) и распределения индукции при намагничивании.

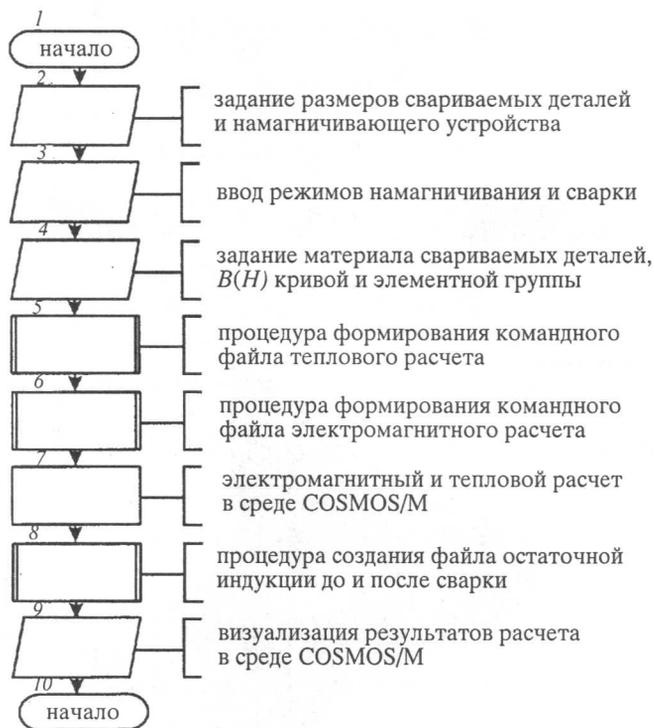


Рис. 5. Обобщенный алгоритм расчета остаточной индукции до и после сварки.

После этого специальная программа осуществляет формирование файла максимальных температур (ниже точки Кюри), на основании данных о температуре в каждом узле модели при дуговой сварке (рис. 6в), и файла остаточной индукции до сварки. Переход к остаточной индукции осуществляется на основании следующей аналитической зависимости [4] (рис. 7а)

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

где  $B_s(H_m)$  — величина индукции на кривой намагничивания материала при напряженности поля  $H_m$ ;  $H_c^\infty$  — коэрцитивная сила предельного цикла;  $H_0$  — параметр, имеющий размерность магнитного поля;

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

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

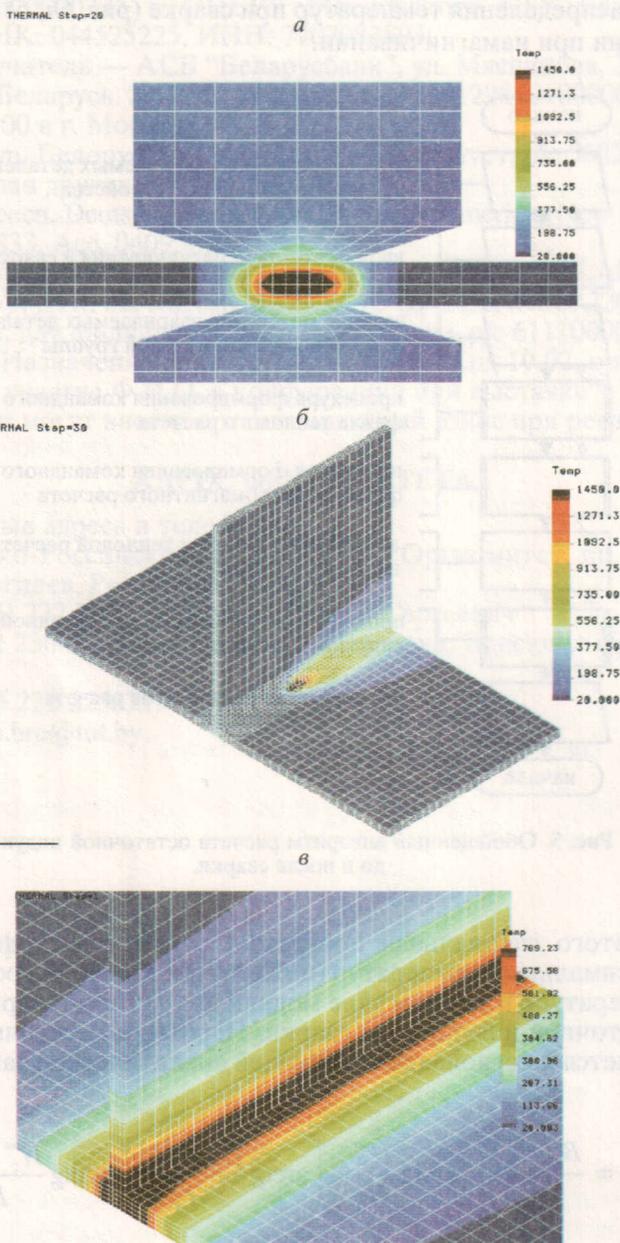


Рис. 6. Распределение температур при сварке:

*a* — контактная точечная сварка; *б* — дуговая сварка; *в* — максимальных температур, не превышающих точку Кюри при дуговой сварке.

Далее на основании информации о величине остаточной индукции до сварки и распределение максимальных температур во время сварки производится расчет остаточной индукции после сварки. Расчет остаточной индукции после сварки осуществляется на основании следующей зависимости [2, 5] (рис. 7б):

$$B_r = \sqrt{k_1 - (k_2 T)^2}, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2$  — коэффициенты, зависящие от степени начального намагничивания;  $T$  — температура металла, °С.

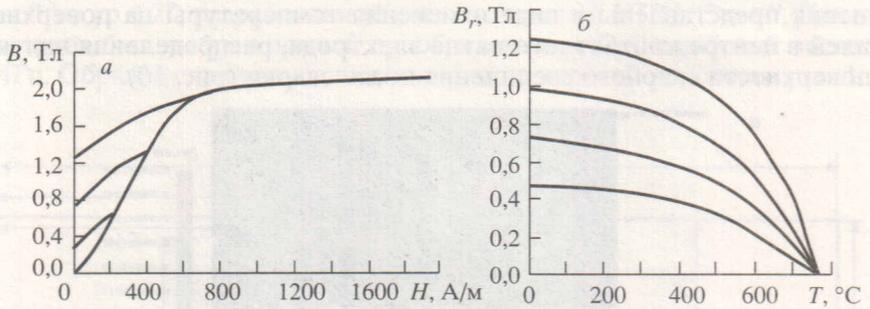


Рис. 7.  $B(H)$  — кривые стали Ст 3 (а); связь между температурой нагрева и остаточной индукцией стали Ст 3 (б).

Результаты расчета визуализируются в среде COSMOS/M (рис. 8).

На рис. 8 приведены картины распределения остаточной индукции до и после дуговой сварки в тавровом соединении. В области сварного шва

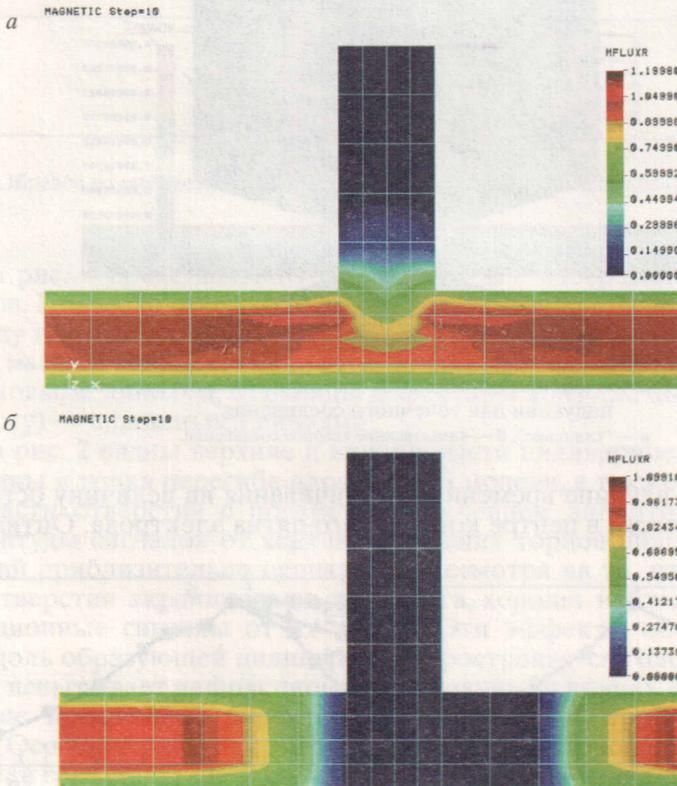


Рис. 8. Распределение остаточной индукции в тавровом соединении: а — до сварки; б — после сварки.

наблюдается возникновение размагниченной зоны. На рис. 9 представлены картины распределения нормальной составляющей остаточной индукции для дефектного и качественного точечного сварного соединения. В зоне контактного пятна электрода при образовании нормального ли-

того ядра наблюдается значительное снижение уровня остаточной индукции.

Расчеты тепловых и магнитных полей в зоне точечного сварного соединения представлены в виде изменения температуры на поверхности деталей в центре контактного пятна электрода, распределения индукции по поверхности сварного соединения после сварки (рис. 10).

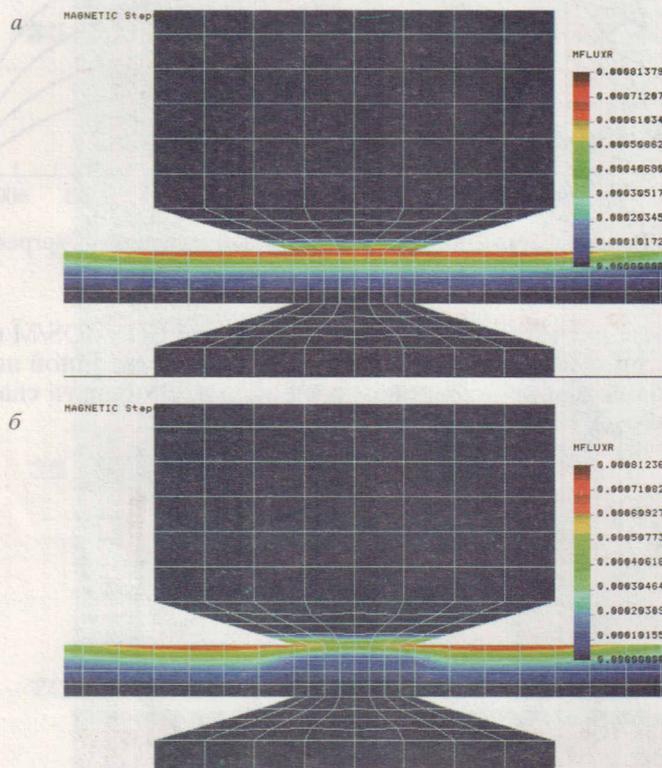


Рис. 9. Распределение нормальной составляющей остаточной индукции для точечного соединения: а — “слипание”, б — качественное сварное соединение.

Исследовано влияние времени намагничивания на величину остаточной намагниченности в центре контактного пятна электрода. Оптималь-

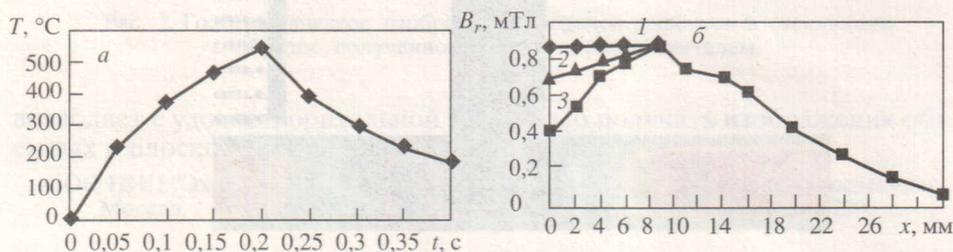


Рис. 10. Изменение температуры в центре контактного пятна электрода ( $\delta = 2 + 2$  мм,  $I_{св} = 12$  кА,  $t_{св} = 0,3$  с) (а); распределение остаточной индукции по поверхности точечного сварного соединения (1 — “слипание”, 2 —  $d_x = 6,45$  мм, 3 —  $d_x = 7,35$  мм) (б).

ным временем намагничивания, обеспечивающим наиболее широкий диапазон варьирования величины остаточной индукции для качественного сварного соединения, является время от 0,01 до 0,1 с.

Получены зависимости глубины проплавления от режимов сварки (напряжения, тока, скорости) для стыковых и тавровых соединений деталей различных толщин, выполненных дуговой сваркой.

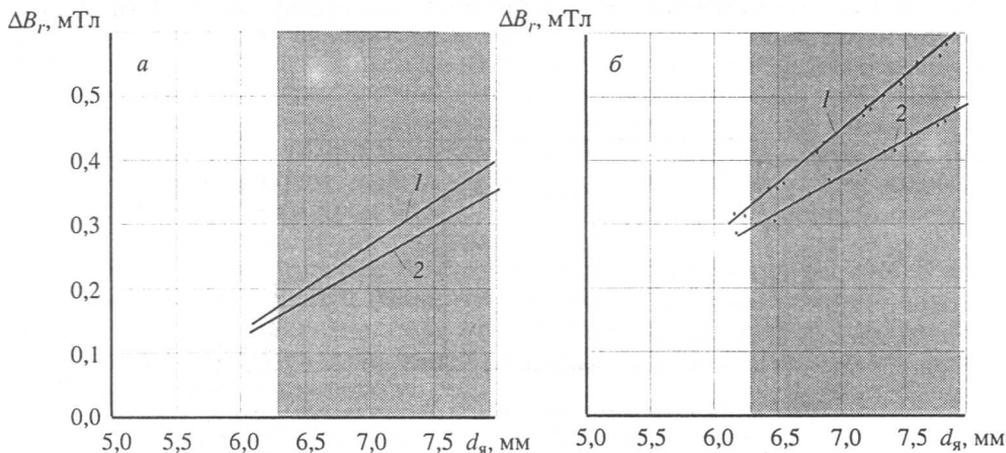


Рис. 11. Изменение индукции в центре контактного пятна электрода в зависимости от диаметра электрода (толщины свариваемых деталей 2+2 мм): а — теоретическая зависимость, б — экспериментальная; 1 —  $t_{\text{нам}} = 0,4$  с, 2 —  $t_{\text{нам}} = 0,6$  с.

В ходе теоретических исследований получены зависимости изменения остаточной индукции в центре контактного пятна электрода от диаметра литого ядра для различных толщин свариваемых деталей и режимов намагничивания (рис. 11а), а также зависимости величины зоны размагничивания на поверхности стыковых и тавровых сварных соединений деталей различных толщин от глубины их проплавления (рис. 12а).

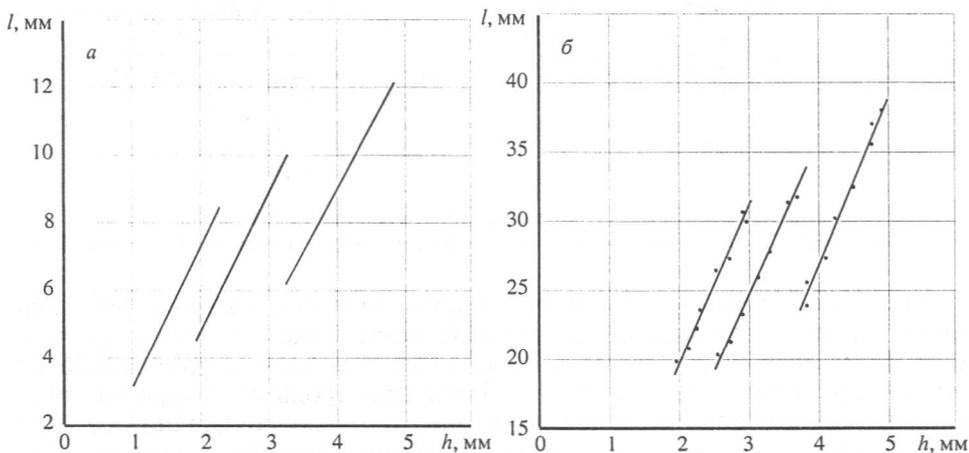


Рис. 12. Зависимость глубины проплавления тавровых сварных соединений от величины зоны размагничивания: а — теоретическая зависимость, б — экспериментальная зависимость,  $\delta = 3, 4, 6$  мм.

Кроме того, в ходе обработки результатов экспериментальных исследований получены корреляционные зависимости между исследуемыми параметрами (рис. 11б, рис. 12б). Причем коэффициенты корреляции для представленных зависимостей не ниже 0,95. Полученные экспериментальные и теоретические зависимости качественно ведут себя одинаково.

В результате разработана методика магнитно-теплого способа контроля диаметра литого ядра точки, которая заключается в следующем. Измеряется уровень нормальной составляющей остаточной индукции на поверхности намагниченных деталей без протекания сварочного тока. Далее

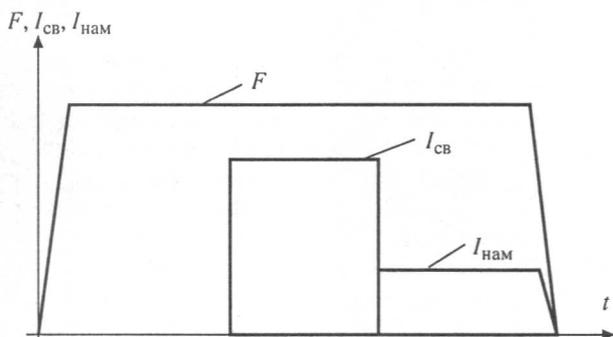


Рис. 13. Циклограмма процесса намагничивания и сварки ( $F$  — основное усилие сжатия электродов,  $I_{св}$  — сварочный ток,  $I_{нам}$  — ток намагничивания).

производится сварка и намагничивание области сварного соединения по представленной на рис. 13 циклограмме. После сварки каждой точки определяется остаточная индукция в центре контактного пятна электрода и по изменению ее уровня по сравнению с несваренным образцом на основании полученных зависимостей судят о диаметре литого ядра точки.

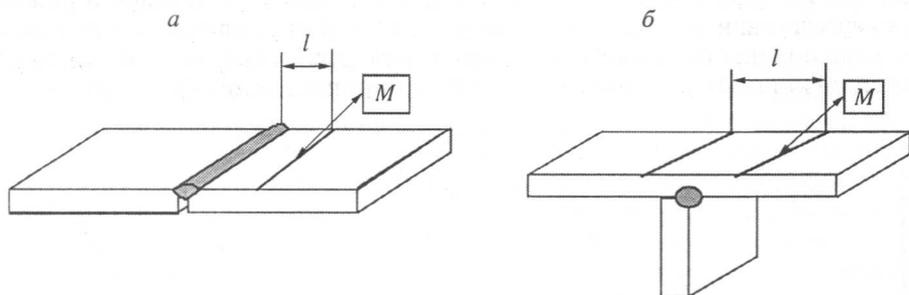


Рис. 14. Схемы измерения зоны размагничивания:

$a$  — стыковое соединение,  $b$  — тавровое соединение;  $l$  — величина зоны размагничивания,  $M$  — магнитометр.

Методика магнитно-теплого способа контроля глубины проплавления сварных соединений при дуговой сварке заключается в следующем. После прихватки деталей осуществляется их намагничивание по схемам, представленным на рис. 5. Далее производится сварка на рекомендуемых режимах с токоподводом для стыковых соединений на одну из деталей и тавровых — на стенку. Измерение величины зоны размагничивания производится по схемам, представленным на рис. 14 с помощью специальной установки для снятия величины остаточной индукции. Далее по величине зоны размагничивания на основании полученных зависимостей судят о качестве сварного соединения.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен новый магнитно-тепловой метод контроля сварных соединений, основанный на намагничивании изделия до или в процессе сварки и последующей регистрации изменений остаточной индукции,

происходящих под воздействием теплового поля в зонах металла, нагреваемых близко к точке Кюри.

2. Установлено, что при контактной точечной сварке в качестве информативного параметра, характеризующего размер сварного соединения, целесообразно использовать нормальную составляющую остаточной индукции в центре контактного пятна электродов при намагничивании зоны сварки однополярным импульсом длительностью 0,04—0,06 с, создаваемым соленоидом в момент выключения сварочного тока.

3. При контроле сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, намагничивание изделия целесообразно проводить до ее осуществления, определение глубины проплавления производится по ширине зоны размагничивания, создаваемой тепловым полем.

4. Разработаны программное обеспечение и методика расчета остаточных магнитных полей после сварки предварительно намагниченных деталей. Исследовано влияние режимов сварки на диаметр литого ядра и глубину проплавления стыковых и тавровых сварных соединений. Разработаны методики их контроля.

Могилевский государственный  
технический университет

Поступила в редакцию  
21 января 2003 г.;  
в окончательном варианте —  
18 сентября 2003 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль (В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков) Под ред. В.В. Сухорукова.— М.: Высш. шк., 1992.— 312 с.
2. Шарова А.М. Контроль качества сварки магнитографическим методом.— Минск: Высш. шк., 1979.— 120 с.
3. Патент Республики Беларусь по заявке № а19980950 от 21.10.98 г.
4. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей.— Минск: Наука и техника, 1980.— 184 с.
5. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов. М., 1956.— 257 с.