

УДК 620.179

**В.П. Куликов, д-р техн. наук, проф., А.М. Белягов, канд. техн. наук., доц.,  
С.В. Болотов, канд. техн. наук**

## **КОНТРОЛЬ НАРУШЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ**

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований магнитных характеристик металла в зоне сварных соединений теплоустойчивых сталей разработана методика контроля нарушений термического цикла сварки.

Сварка теплоустойчивых сталей (12X1MФ, 15X1M1Ф и др.) является основным технологическим процессом в энергомашиностроении при изготовлении пароперегревателей, коллекторов котлов, паропроводов и других узлов металлоконструкций, работающих в условиях длительного приложения нагрузки при высоких и изменяющихся температурах. Технология их сварки включает в себя три операции: предварительный подогрев кромок, сварка, термообработка [1]. Режимы этих операций должны выбираться тщательно и строго выдерживаться. Отклонение параметров от оптимальных значений вызывает образование в зоне шва неблагоприятной структуры и фазового состава, а следовательно, приводит к повышенной склонности швов к замедленному разрушению, снижению ресурса работы, а иногда к созданию аварийных ситуаций. Наиболее уязвимыми при этом являются участки сплавления и перегрева, где наиболее вероятно образование трещин [2]. Механизм разрушения на этих участках может быть различным и определяется структурой и фазовым составом металла, зависящим от скорости охлаждения в соединении при сварке.

При быстрых скоростях охлаждения в зоне термического влияния (ЗТВ) возникают мартенситные структуры, имеющие пониженную деформационную способность. Трещины образуются по механизму хладноломкости под действием сварочных напряжений, особенно в условиях повышенной жесткости конструкции и наличия в зоне соединения водорода.

Основное технологическое нарушение при этом - сварка на низких погонных энергиях или заниженная температура предварительного подогрева кромок.

При чрезмерно высоких температурах предварительного подогрева и высоких погонных энергиях (низких скоростях охлаждения) в ЗТВ распад аустенита происходит в высокотемпературной области с образованием грубой перлитно-ферритной структуры, имеющей крупное зерно и пониженную пластичность. Это приводит к охрупчиванию шва и образованию трещин в процессе эксплуатации по механизму синеломкости.

На ресурс работы сварных соединений из теплоустойчивых сталей существенное влияние оказывает участок неполной перекристаллизации «белая полоса», образующийся при нагреве металла в интервале температур  $A_{c1}$ - $A_{c3}$ . На этом участке наблюдается разупрочнение металла из-за повышенного содержания феррита. Он отличается низкими пределами текучести и прочности металла, пониженной на 10...20 % жаропрочностью. Малопрочная прослойка возникает при сварке с повышенным тепловложением и развивается при термической обработке и последующей эксплуатации конструкции. Разрушение конструкций в этой зоне происходит при длительной эксплуатации (70...80 тыс. ч) за счет процессов ползучести.

Для снятия остаточных напряжений, выравнивания структуры, улучшения работоспособности сварных соединений теплоустойчивых сталей после сварки производится термообработка - высокий отпуск, нормализация, отдых и др. Для энергетического

оборудования применяется высокий отпуск, температуру которого выбирают в пределах 720...750 °С. При более высоких температурах отпуска (780...790 °С) происходит чрезмерное повышение пластичности в ущерб прочности, особенно на участке «белой полосы», что снижает ресурс работы соединения.

Таким образом, наиболее многочисленными и опасными дефектами сварных соединений теплоустойчивых сталей являются трещины, возникающие из-за различных нарушений термического цикла сварки в «хрупкой» и «мягкой» прослойках зоны термического влияния. Структурно-фазовый состав и механические свойства этих участков являются решающими в оценке длительной прочности и долговечности сварных соединений.

В [3] показано, что распределение твердости в сварном соединении теплоустойчивых сталей однозначно связано с параметрами подогрева и термообработки. Известно, что твердость достаточно тесно коррелирует с коэрцитивной силой металла [4], что создаёт предпосылки для использования характера распределения коэрцитивной силы в зоне сварного соединения теплоустойчивых сталей в качестве информативного параметра для обнаружения нарушений термического цикла сварки.

Для измерений коэрцитивной силы используется метод «точечного полюса» и импульсно-локальный метод, разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси. Сущность методов состоит в том, что изделие намагничивают перпендикулярно поверхности постоянным магнитом или соленоидом, после чего измеряют поле остаточной намагниченности, которое пропорционально коэрцитивной силе.

Для выбора оптимальной схемы намагничивания произвели расчет магнитного поля соленоида и стержневого постоянного магнита в среде COSMOS/M. Расчетные модели основывались на использовании плоских четырехузловых конечных элементов. В сварном соединении выделялись четыре зоны, отличающиеся по магнитным свойствам, структуре и фазовому составу: сварной шов, участок перегрева, участок неполной перекристаллизации и основной металл.

Проведенные расчёты показали, что наиболее целесообразно использовать схему намагничивания с помощью стержневого постоянного магнита, которая обеспечивает высокий уровень и локальность намагничивания зоны контроля.

Для определения влияния температуры предварительного подогрева кромок на значения поля остаточной намагниченности в зоне шва были проведены эксперименты на стыках труб из стали 12Х1МФ, сваренных с различной температурой подогрева. Рекомендуемые значения находятся в пределах 200...250 °С.

Исследовались четыре технологических режима сварки, обеспечивающие различные скорости охлаждения металла шва. Результаты исследований представлены на рис. 1. На графике нанесены границы допустимых областей коэрцитивной силы. Видно, что отсутствие предварительного подогрева приводит к резкому увеличению поля остаточной намагниченности в зоне сплавления, что объясняется повышенной твердостью участка из-за наличия мартенсита (см. рис. 1, кривая 1). Максимальное значение поля практически совпадает с верхней границей, что свидетельствует о высокой вероятности образования трещин. И как подтверждение, один стык, сваренный без подогрева, после сварки охлаждался в воде, что предопределяло высокие скорости охлаждения шва (70 град/с). У края шва в этом случае образовывалась трещина. При подогреве кромок поле остаточной намагниченности становится более равномерным. При температурах предварительного подогрева, близких к максимально-рекомендуемым значениям, на разупрочненном участке «белой полосы» наблюдается «провал» поля остаточной намагниченности, связанный со снижением твердости. При температурах подогрева 350 °С значение поля находится на нижней критической границе.

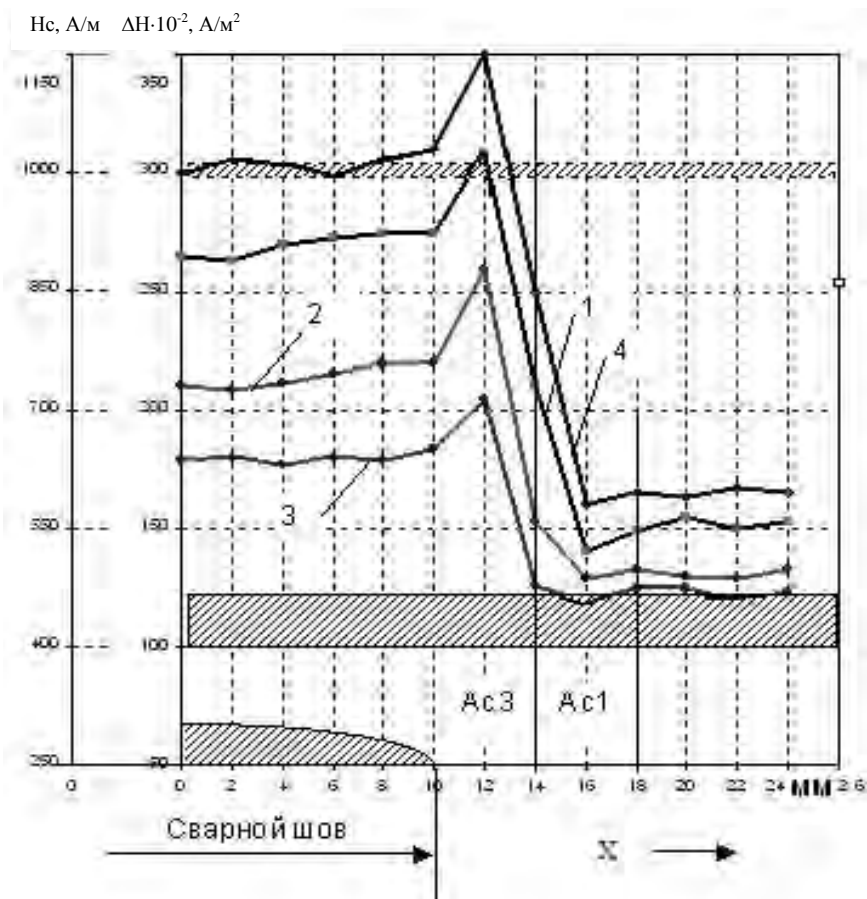


Рис. 1. Распределение коэрцитивной силы (поля остаточной намагниченности) в зоне соединения, сваренного при различной температуре предварительного подогрева: 1 -  $T_{\text{под}} = 0^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $T_{\text{под}} = 200^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $T_{\text{под}} = 350^{\circ}\text{C}$ ; 4 -  $T_{\text{под}} = 0^{\circ}\text{C}$  (охлаждение в воде)

Зависимости (см. рис. 1) могут быть использованы для контроля правильности технологической операции предварительного подогрева и приблизительной оценки ее температурных параметров.

Для определения связи между режимом отпуска и магнитными характеристиками проводились экспериментальные исследования на стыках труб, технология сварки которых предусматривала одинаковую температуру предварительного подогрева  $200^{\circ}\text{C}$ , но разные температуры отпуска. Графики распределения поля остаточной намагниченности в зоне сварного шва представлены на рис. 2.

При низкой температуре отпуска  $T_{\text{отп}} = 680^{\circ}\text{C}$  значения коэрцитивной силы в зоне сплавления достаточно велики. При повышении температуры отпуска до  $730^{\circ}\text{C}$  происходит выравнивание поля остаточной намагниченности по сечению образца. При полном соблюдении термического цикла сварки достигается равномерное распределение поля остаточной намагниченности без больших градиентов. При  $T_{\text{отп}} = 780^{\circ}\text{C}$  значения коэрцитивной силы близки к пороговым. Наилучшие результаты дает нормализация с последующим отпуском (рис. 2, кривая 4). Для особо ответственных конструкций такой вид термообработки может быть предпочтительным.

Таким образом, проведенные исследования показали наличие корреляции между режимами подогрева кромок, высокого отпуска и значениями поля остаточной намагниченности в зоне сварного шва. Это дает возможность оценить правильность проведения термического цикла сварки по магнитным характеристикам.

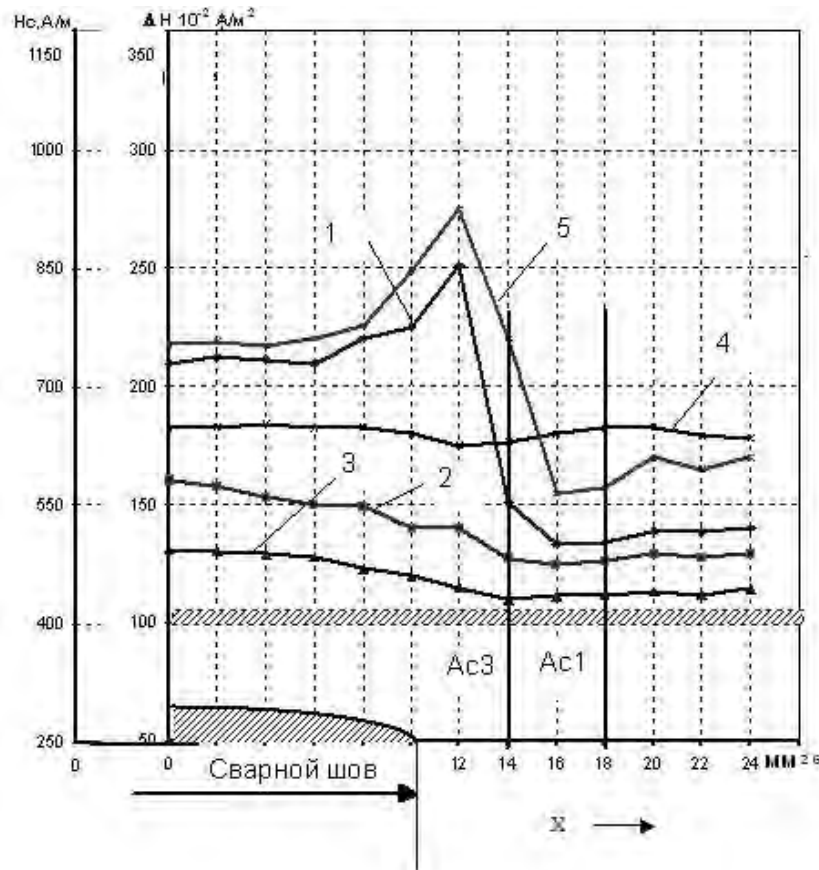


Рис. 2. Распределение коэрцитивной силы (поля остаточной намагниченности) в зоне сварного соединения после высокого отпуска: 1 -  $T_{\text{отп}} = 680^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $T_{\text{отп}} = 730^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $T_{\text{отп}} = 780^{\circ}\text{C}$ ; 4 - нормализация с последующим отпуском  $T_{\text{отп}} = 780^{\circ}\text{C}$ ; 5 - при оптимальном подогреве без отпуска

Методика контроля термического цикла сварки заключается в измерении коэрцитивной силы в зоне сварного соединения. Измерения осуществляются прибором МС-1, показания которого пропорциональны полю остаточной намагниченности, которое, в свою очередь, линейно связано с коэрцитивной силой.

Методика контроля предусматривает пошаговое, через 1 мм, измерение коэрцитивной силы в зоне шва, построение графиков зависимостей  $H_c = f(x)$  и определение площадей критических зон (рис. 3).

Критическими зонами являются зоны  $S_1$  и  $S_2$ , находящиеся за пределами критических значений  $H_{c_{кр1}}$  и  $H_{c_{кр2}}$ :

$$S_1 = \int_{x_1}^{x_2} H_c dx - H_{c_{кр1}}(x_2 - x_1); \quad S_2 = H_{c_{кр2}}(x_4 - x_3) - \int_{x_3}^{x_4} H_c dx.$$

Значение браковочных признаков  $S_{1_{кр}}$  и  $S_{2_{кр}}$  определяют предварительными исследованиями для конкретного материала.

Исследования методики контроля в производственных условиях проводили на ТЭЦ-2 г. Могилева. Оценку параметров термического цикла сварки осуществляли на трубах из стали 12Х1МФ толщиной стенки 20 мм, сваренных ручной сваркой. Предла-

гаемая методика контроля позволяет достаточно точно выявить нарушения термического цикла, выразившиеся в нарушении режимов подогрева или отпуска.

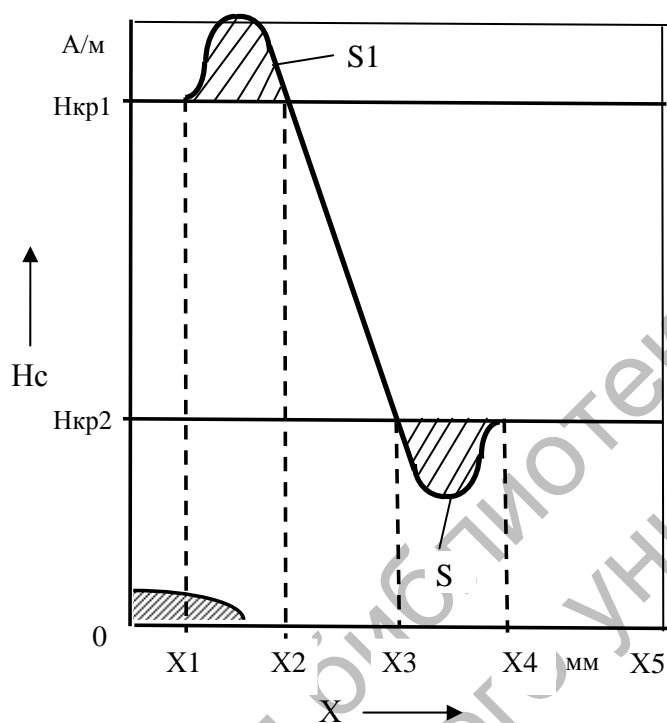


Рис. 3. Схема оценки термического цикла сварки при пошаговом измерении коэрцитивной силы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов, Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей / Р. А. Козлов. - М. : Машиностроение, 1986. – 160 с.
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под. ред. Б. Е. Патона. - М. : Машиностроение, 1974. - 768 с.
3. Выявление нарушений технологии сварки энергетических трубопроводов из теплоустойчивых сталей по магнитным характеристикам сварных соединений / В. В. Вагин [и др.] // Сварка и родственные технологии. - Мн., 2000. - С. 91-93.
4. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М. А. Мельгуй. - Мн. : Наука и техника, 1980. – 184 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 24.12.2005

V.P. Kulikov, A.M. Beljagov, S.V. Bolotov  
The control of infringements of a thermal cycle  
of welding heatproof steels under magnetic  
characteristics of metal in a zone of thermal influence  
Belarusian-Russian University

On the basis of lead theoretical and experimental researches of magnetic characteristics of metal in a zone of welded connections heatproof steels the technique of the control of infringements of a thermal cycle of welding is developed.