

## **ЗАМЕДЛЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

© 2010 М.Н. Сивцев, Г.Н. Слепцов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

Поступила в редакцию 31.03.2010

В работе выявлены факторы, влияющие на свариваемость высокопрочных низколегированных сталей и разработаны требования к свойствам сварных соединений, предназначенных для работы при низких температурах. Представлена методика оценки технологической прочности сварных соединений замедленного разрушения образцов-вставок при стационарной и адаптивно-импульсной сварке с помощью метода акустико-эмиссионной диагностики и фрактографических исследований. Показано, что совокупность параметров акустической эмиссии могут служить критериями структурного состояния и основой неразрушающего метода оценки прочностных свойств сварного соединения.

*Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные низколегированные стали, замедленное разрушение, акустическая эмиссия, прочность*

Высокопрочные низколегированные стали находят широкое применение при изготовлении тяжелонагруженных сварных узлов и конструкций горнодобывающей техники. Все эти стали имеют различные уровни служебных свойств и хладостойкости и существенно различаются по свариваемости. Перспективным направлением в развитии феноменологических подходов к изучению проблемы замедленного разрушения сварных конструкций является разработка деформационных подходов с учетом релаксации сварочных напряжений [1]. Существующие критерии оценки основаны на прочностном подходе к замедленному разрушению без учета деформационной истории материала сварного соединения, которая существенно влияет на напряженное состояние в сварном соединении [2].

Таким образом, критерии, применяемые для оценки склонности к замедленному разрушению [3, 4], требуют уточнений и дополнений в связи с необходимостью учета кинетических процессов происходящих в сварном соединении. Учет кинетических процессов, обнаружение возникновения микро- и макро-трещин определенного размера в условиях

эксплуатации сварных конструкций, в настоящее время возможно благодаря современным методам неразрушающего контроля сварных конструкций, таким как, метод акустической эмиссии (АЭ) [5, 6]. Поэтому разработка новых подходов к оценке замедленного разрушения сварных конструкций с учетом деформационных параметров разрушения в условиях релаксации сварочных напряжений является актуальной.

Состав сталей свариваемых материалов и электродов определялся на установке SPECTROLAB-250 (Германия), на оборудовании ICPQ-100 (Inductively Coupled Plasma Quantometer, Япония). Данные для свариваемых сталей на основе пяти измерений приведены в таблице 1, для электродов – в таблице 2.

Одним из факторов, влияющих на склонность сварного соединения к замедленному разрушению, является водород, содержащийся в металле шва, а способность к десорбции водорода из материала покрытия при прокатке влияет на его содержание в металле шва после сварки. Установлено, что сопротивляемость образованию холодных трещин сварных соединений стали 14Х2ГМР сильно зависит от химического состава наплавленного металла, несмотря на то, что максимальная твердость в зоне термического влияния (ЗТВ) во всех случаях была практически одинаковой ( $3800 \pm 70$  МПа). Наибольшая величина

*Сивцев Михаил Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: m.n.sivtsev@iptpn.ysn.ru*

*Слепцов Гаврил Николаевич, младший научный сотрудник. E-mail: g.n.sleptsov@iptpn.ysn.ru*

минимального разрушающего напряжения ( $\sigma_{\text{pmin}}$ ) была получена при сварке электродами 48Н11, содержащими в направленном металле 2,25% никеля. Electroды ЖАНП-4, содержащие в направленном металле 0,77% никеля

дают почти такой же результат, что и электроды Шварц ЗК, не содержащие никель. Поэтому изменение не может быть связано с различным содержанием никеля в наплавленном металле.

**Таблица 1.** Химический состав свариваемых сталей

| Сталь   | Страна производитель | Содержание элементов, % |          |         |        |       |      |      |       |       |       |       |
|---------|----------------------|-------------------------|----------|---------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|         |                      | C                       | Si       | Mn      | S      | P     | Cr   | Mo   | Ni    | V     | B     | Cu    |
| 14X2ГМР | Россия               | 0,19                    | 0,4      | 0,9-1,2 | 0,035  | 0,035 | 0,59 | 0,27 | 0,3   | 0,03  | 0,002 | 0,007 |
| 13ХГМРБ | Россия               | 0,145                   | 0,37     | 0,42    | 0,034  | 0,036 | 0,85 | 0,01 | 0,49  | 0,015 | 0,001 | 0,14  |
| T -1    | США                  | 0,17                    | 0,54-0,6 | 0,89    | 0,03   | 0,029 | 0,6  | 0,23 |       | -     | -     |       |
| HQ-80C  | КНР                  | 0,15                    | 0,23     | 0,90    | 0,0033 | 0,022 | 0,84 | 0,30 | 0,033 | 0,042 |       | 0,14  |
| HQ-70   | КНР                  | 0,16                    | 0,33     | 1,05    | 0,33   | 0,015 | 0,61 | 0,47 | 1,02  | 0,081 |       | 0,32  |

**Таблица 2.** Химический состав наплавленного металла исследованных электродов

| Марка электрода    | Содержание элементов, % |      |      |      |      |      |        |
|--------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|--------|
|                    | C                       | Mn   | Si   | Ni   | Cr   | Mo   | B      |
| 48Н – 11 (Россия)  | 0,08                    | 0,9  | 0,3  | 2,25 | 0,35 | 0,35 |        |
| АНП – 2 (Россия)   | 0,09                    | 1,0  | 0,34 | 0,6  | 1,2  | 0,3  |        |
| ЖАНП-4 (Россия)    | 0,09                    | 0,67 | 0,21 | 0,77 | 0,26 | 0,19 | 0,0017 |
| L – 60 (Япония)    | 0,1                     | 1,32 | 0,32 | 0,63 | 0,26 | 0,25 |        |
| Шварц ЗК (Австрия) | 0,08                    | 1,12 | 0,14 | -    | -    | 0,55 |        |

Легирующие элементы по-разному влияют на фазовые переходы, происходящие в твердой фазе. Расчет температуры начала мартенситного распада аустенита ( $M_n$ ) по формуле Кое (1) [7] для присадочных материалов и разности температур между началом мартенситного распада в стали 14Х2ГМР и в наплавленном металле (табл. 3) показал, что электроды, имеющие меньшую разность температуры распада аустенита по сравнению с основным металлом, обеспечивает получение более стойких против образования холодных трещин сварных соединений.

$$M_n = (539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 7,5Mo)^0 C \quad (1)$$

Электроды 48Н11, имеющие наименьшую  $M_n$ , дают наилучшие результаты при сварке высокопрочной стали 14Х2ГМР. Так как предел текучести данной стали равен 650 МПа, то при сварке электродами 48Н11, прокаленными при 400°C в течение двух часов, образование холодных трещин исключается.

**Таблица 3.** Свойства при мартенситном распаде

| Марка электродов | $\sigma_{\text{pmin}}$ , МПа | $M_n$ , °C | $\Delta M_n$ , °C |
|------------------|------------------------------|------------|-------------------|
| 48НП             | 650                          | 431        | 11                |
| ЖАНП-4           | 500                          | 464        | 44                |
| L-60             | 600                          | 443        | 23                |
| Шварц ЗК         | 500                          | 467        | 47                |

Учитывая, что сталь 14Х2ГМР более склонна к образованию холодных трещин, чем сталь рамы подъема экскаватора Марион - 204М, можно гарантировать достаточную технологическую прочность сварных соединений, выполненных данными электродами.

Таким образом, в результате проведенных работ выяснено, что стали с прочностью до 560 МПа можно сваривать безникелевыми электродами, для сварки более прочных сталей необходимо выбрать те сварочные материалы, у которых наплавленный металл имеет наименьшую температуру мартенситного распада аустенита. Эти результаты были подтверждены на практике при ремонте узлов двадцатикубового экскаватора Марион -204 М. Химический состав и механические свойства сталей узлов представлены на таблице 4.

**Таблица 4.** Химический состав и механические свойства узлов

| Сталь            | Содержание элементов, % |           |           |      | Механические свойства |                   |              |                             |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|------|-----------------------|-------------------|--------------|-----------------------------|
|                  | C                       | Mn        | Si        | Mo   | $\sigma_B$<br>МПа     | $\sigma_T$<br>МПа | KCV<br>-60°C | Мдж/м <sup>2</sup><br>-80°C |
| жесткая<br>опора | 0,16                    | 1,28-1,48 | 0,32-0,52 | 0,1  | 565                   | 410               | 0,4          | 0,3                         |
| рама<br>подъема  | 0,09                    | 1,32      | 0,17      | 0,25 | 610                   | 544               | 0,84         | 0,6                         |

**Таблица 6.** Зависимости деформационного параметра  $\lambda_{кр}$  от параметров термического цикла

| $Q_{пог}$<br>кДж/см МПа | $W^{300}$ ,<br>град/с | $t_{100}$ ,<br>сек | $t_{инк}$ ,<br>час | $t_{разр}$ ,<br>час | $\lambda_{кр}$<br>мкм | $\sigma_{кр}$<br>МПа |
|-------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 10                      | 15                    | 60                 | 5                  | 8                   | 3,5                   | 560                  |
| 17                      | 10,5                  | 110                | 0,5                | 6                   | 5,6                   | 520                  |
| 25                      | 4,5                   | 250                | 2                  | 8                   | 6,3                   | 560                  |

Сравнение деформационных параметров разрушения при разных уровнях погонной энергии сварки проводились при  $J_{св}=170$  А электродом АНП-2 диаметром 4 мм и погонных энергиях сварки 10, 17, 20, 25 кДж/см. В таблице 6 показаны зависимости деформационного параметра  $\lambda_{кр}$  от параметров термического цикла. Выявлено неоднозначное влияние уменьшения скорости охлаждения при увеличении погонной энергии сварки на деформационные параметры замедленного разрушения. Так, наименьшее инкубационное время  $t_{инк}$  обнаружено при скорости  $W^{300}=10,5^\circ\text{C/с}$ . Наибольшее значение  $t_{инк}$  имеет кривая разрушения при  $W^{300}=15^\circ\text{C/с}$ .

По показателю  $t_p$  – время до разрушения, самое короткое время имеется при скорости  $10,5^\circ\text{C/с}$  равное шести часам. При скоростях  $W^{300}=4,5^\circ$  и  $15^\circ\text{C/с}$  она примерно равна восьми часам. Таким образом, обнаруженная сложная зависимость деформационных параметров замедленного разрушения от скорости охлаждения показывает, что наряду с уже применяемыми характеристиками замедленного разрушения для уточнения механизма и степени влияния различных факторов (структуры, водорода и т.д.) необходимо использовать деформационные параметры замедленного разрушения.

Для регистрации сигналов акустической эмиссии применен акустико-эмиссионный диагностический комплекс «Эксперт-2014», являющийся акустико-эмиссионной диагностической системой нового поколения, позволяющей получать как амплитудные и энергетические, так и спектральные характеристики акустической эмиссии (АЭ). Различные типы ручной дуговой сварки обеспечивались с помощью следующих устройств: стационарная

сварка – ВД-306э, адаптивная импульсная сварка – УДИ-205 (разработка Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск). Для реализации образования холодных трещин в сварном соединении использовали машинный метод испытаний метод «Импламент» [8].

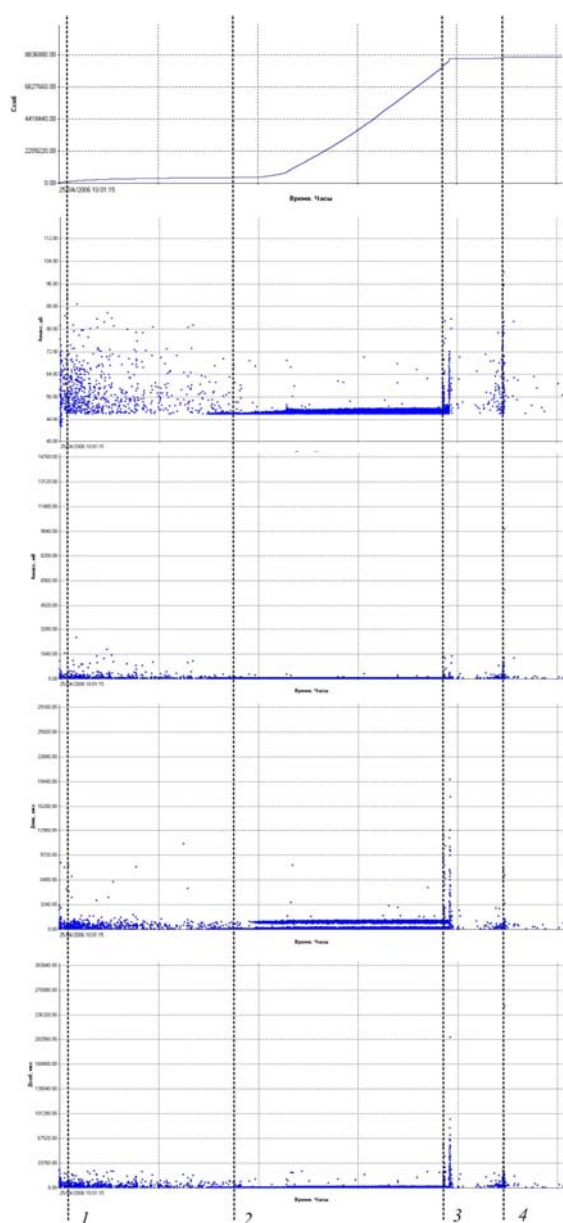
Анализ проведенных экспериментальных данных показал, что параметры акустической эмиссии полностью коррелируют с механическими параметрами процессов разрушения и деформации материалов, что подтверждается многими работами [5, 6, 9]. На рис. 1 представлены типичные для замедленного разрушения кривая разрушения и совмещенные распределения разных параметров АЭ от времени разрушения, где достаточно четко можно определить основные стадии возникновения замедленного разрушения. Анализ экспериментальных данных параметров АЭ дает основание выделить особые 4 точки (момента времени) на кривой разрушения и совместить их с распределениями разных параметров АЭ:

1. Диапазон времени с точки №1 до точки №2 показывает микропластический тип деформации. Наличие акустических сигналов при малых деформациях обусловлено нестационарным движением дислокации вдоль плоскостей легкого скольжения, которое сопровождается процессами их генерации и торможения [5].

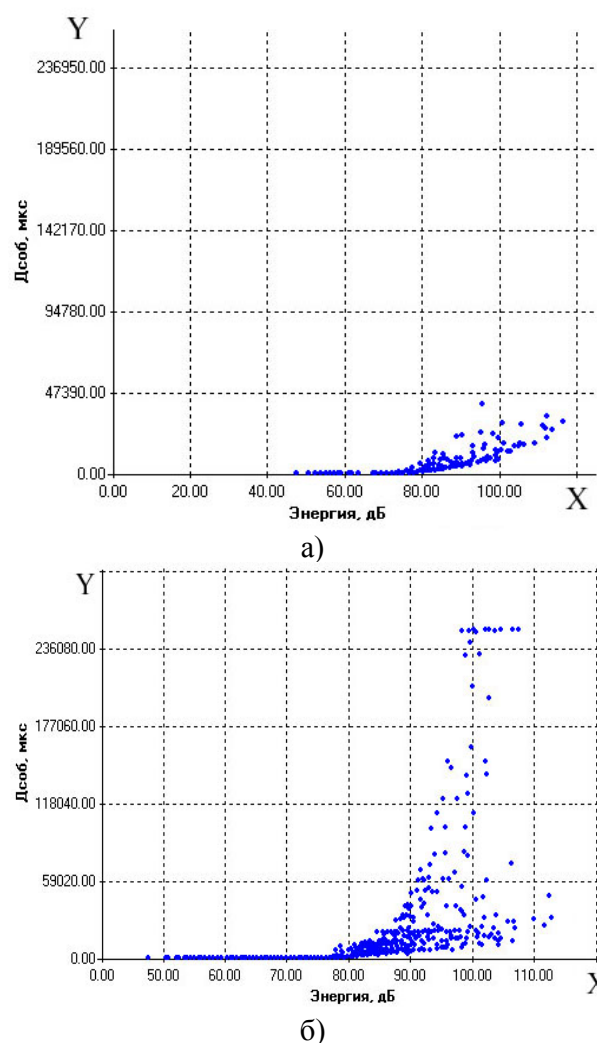
2. Точка №2 соответствует моменту времени, когда величина напряжений в образце равна пределу прочности сварного соединения, с этого момента наблюдается постепенное увеличение суммарного счета сигналов АЭ за счет развития микротрещин.

3. Диапазон времени с точки №3 до точки №4 показывает резкое возрастание активности сигналов АЭ, что говорит о накоплении повреждений в структуре сварного соединения на предразрушающем состоянии образца [6].

4. В момент времени в точке №4 показывает возобновление активности параметров АЭ и резкое возрастание значений этих параметров, что соответствует гипотезе о лавинном накоплении повреждений в материалах. Резкий спад активности сигналов АЭ указывает на формирование шейки на рабочей зоне образца.



**Рис. 1.** Распределения сигналов разных параметров АЭ от времени разрушения сварного соединения образца 14X2ГМР и кинетика изменения параметров АЭ в процессе замедленного разрушения

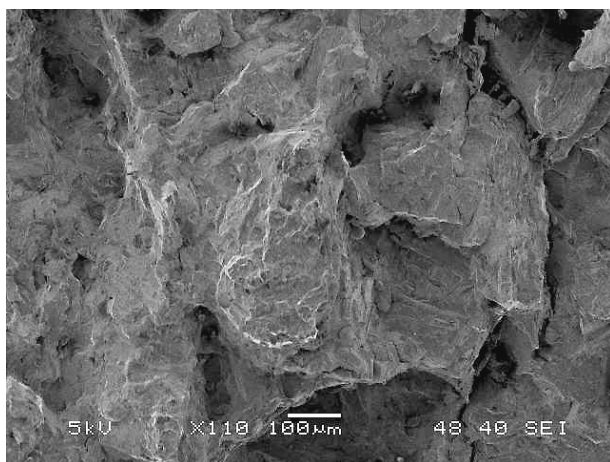


**Рис. 2.** Распределение сигналов по энергии АЭ при замедленном разрушении: а) стационарная сварка, б) адаптивно-импульсная сварка

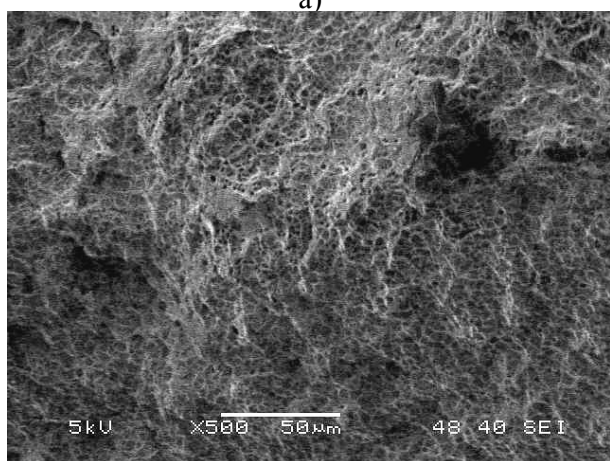
Металлографические исследования образцов, выполненных адаптивной импульсной сваркой, выявили значительное измельчение структуры металла шва и наиболее подверженной структурным изменениям ЗТВ [10]. В результате происходит повышение микротвердости и прочности в этих зонах, что уменьшает возможность возникновения участков разупрочнения в околошовной зоне и повышает стойкость к возникновению и распространению трещин в сварном соединении в целом [11]. Исследования поверхности разрушений позволяют утверждать, что по характеру распределения активности параметров АЭ можно определить основной характер разрушения материала. Например, при сварке в стационарном и адаптивно-импульсном режимах, получили следующие распределения энергетических параметров АЭ (рис. 2). Из данных представленных распределений видно, что на рис. 2б распределение энергетических параметров имеют большую активность, чем на рис. 2а. Анализ данных распределений

показывает, что образец, выполненный при стационарной сварке, разрушился более хрупко и имеет более низкую сопротивляемость к разрушению по прочностным свойствам, чем образец выполненный адаптивно-импульсной сваркой. Это утверждение подтверждаются фрактографическими данными рис. 3.

Исследование микроструктуры поверхности разрушения, полученной при стационарной сварке, подтверждает, что данный материал имеет низкую сопротивляемость к разрушению (рис. 3а). Исследование микроструктуры поверхности разрушения, полученной при адаптивно-импульсной сварке, дает основание утверждать, что данный материал имеет высокую сопротивляемость к разрушению (рис. 3б). Анализ экспериментальных данных показал, что при использовании адаптивно-импульсного режима сварки увеличивается сопротивляемость к разрушению сварного соединения.



а)



б)

**Рис. 3.** Поверхность разрушения образцов: а) стационарная сварка – поверхность разрушения образца – хрупкое внутризеренное разрушение, б) адаптивно-импульсная сварка – вязкий характер разрушения, что свидетельствует о достаточно высоком сопротивлении материала разрушению

## Выводы:

1. Показано влияние присадочного материала на параметры замедленного разрушения и неоднозначное влияние погонной энергии сварки на деформационные свойства материала зоны термического влияния.

2. На основе исследования кинетики зарождения очага замедленного разрушения, разницы температуры мартенситного превращения в шве и основном металле и содержания диффузионного водорода определены необходимые меры предотвращения замедленного разрушения сварных соединений.

3. Анализ совокупности параметров АЭ позволяет достаточно четко выделить момент образования микротрещин в образце-вставке, что в свою очередь является одной из важных составляющих образования холодных трещин в сварном соединении.

4. При помощи совокупности параметров АЭ замедленного разрушения показано, что использование адаптивно-импульсного режима сварки увеличивает сопротивляемость к разрушению сварного соединения и способствует повышению технологической прочности сварных соединений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ларионов, В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск: Наука, Сиб.отд-е, 1986. – 256 с.
2. Касаткин, Б.С. Методика определения деформаций при замедленном разрушении / Б.С. Касаткин, В.И. Бреднев, В.В. Волков // Автомат. сварка. – 1981. - № 11. – С. 1-3.
3. Бреднев, В.И. Удельная работа образования очагов холодных трещин при сварке низколегированных высокопрочных сталей / В.И. Бреднев, Б.С. Касаткин // Автомат. Сварка. – 1988. - № 11. – С. 6-8, 11.
4. Sawhill, J.H. Modified implant test for studying delayed cracking / J.H. Sawhill, A.W. Dix, W.F. Savage // Weld. J. – 1974. - №12. – P. 554-560.
5. Андрейкив, А.Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак. – Киев: Наукова думка, 1989. – 175 с.
6. Семашко, Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др.. – М: Машиностроение, 2002. – 240 с.
7. Coe, F.R. Welding Steel Without Hydrogen Cracking. DOC-IIW-II-512-69.
8. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образования холодных трещин при сварке плавлением. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 22 с.

9. Буйло, С.И. Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения / С.И. Буйло, А.В. Попов // Дефектоскопия РАН. – 2002. - №9. – С. 45-53.
10. Сараев, Ю.Н. Обеспечение эксплуатационной надежности и экологической безопасности высокоответственных конструкций, работающих в условиях Сибири и Крайнего Севера, с использованием адаптивных технологий импульсной сварки / Ю.Н. Сараев, В.П. Ларионов, О.И. Слепцов и др. // Труды II евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Пленарные доклады. – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 264 с.
11. Слепцов, О.И. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О.И. Слепцов, В.Е. Михайлов, В.Г. Петушков и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 223 с.

## THE SLOWED DOWN DESTRUCTION AND PARAMETERS OF THE ESTIMATION OF TECHNOLOGICAL STRENGTH OF WELDED CONNECTIONS FROM HIGH-STRENGTH STEELS, WORKING AT LOW TEMPERATURES

© 2010 M.N. Sivtsev, G.N. Sleptsov

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov  
SB RAS, Yakutsk

In work the factors influencing on weldability of high-strength low-alloy steels are revealed and requirements to properties of the welded connections intended for work at low temperatures are developed. The technique of estimation the technological strength of welded connections of slowed down destruction on samples-inserts is presented at stationary and adaptive-pulse welding with the help of acoustic-emission diagnosis method and fractographic researches. It is shown, that set of parameters of acoustic emission can serve as criteria of structural condition and basis of not destroying method of estimation the strength properties of welded connection.

*Key words: arc welding, high-strength low-alloy steels, slowed down destruction, acoustic emission, strength*

---

*Mikhail Sivtsev, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: m.n.sivtsev@iptpn.ysn.ru  
Gavriil Sleptsov, Minor Research Fellow. E-mail: g.n.sleptsov@iptpn.ysn.ru*