

УДК 669.017

## **Исследование влияния химического состава сварочных материалов на свойства сварного соединения**

*Д-р техн. наук* **Вологжанина С.А.**<sup>1</sup>, *канд. техн. наук* **Иголкин А.Ф.**, **Жучков Д.В.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>svet\_spb@mail.ru, <sup>2</sup>dmitry\_zhuchkov@live.ru

*Университет ИТМО*

*Институт холода и биотехнологий*

*921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*Развитие пищевых и химических технологий предъявляет особые требования к выбору материалов для оборудования данных производств. Современной тенденцией является повышение нагрузки на узлы и детали машин производств, вследствие чего повышаются требования к материалам. В данной статье рассматривается влияние химического состава сварочных материалов и металла сварного шва на свойства сварного соединения оборудования пищевой и химической промышленности.*

**Ключевые слова:** сварное соединение, механические свойства, альтернативные сварочные материалы.

---

## **Study of the influence of the chemical composition of welding materials on properties of welded joints**

*D.Sc* **Vologjanina S.A.**, *Ph. D* **Igolkin A.F.**, **Juchkov D.V.**

*University ITMO*

*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*

*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*Development of food and chemical technologies imposes special requirements to the choice of materials for equipment production. The modern trend is to increase the load on units and parts of machines manufactures, due to the increased requirements to the materials. This article considers the influence of the chemical composition of welding materials and weld metal on properties of welded connection of equipment for the food and chemical industry.*

**Key words:** welded connection, mechanical properties, alternativwelding materials.

---

Требования к аппаратам пищевых и химических производств определяются агрессивными условиями в технологиях пищевых производств, например: повышенная влажность, резкие перепады температур (в пределах от  $-70$  °С до  $300$  °С), контакт с пищевыми продуктами и активными средами [1-5]. Изготовление аппаратов высокого давления пищевого производства, происходит в соответствии с требованиями Госгортехнадзора РФ. Одним из основных этапов производства в химической и пищевой промышленности является сборка оборудования посредством сварки [6-7].

Надежность конструкций в целом определяют механические свойства сварных соединений. Сварные швы или околошовная зона являются типичными очагами разрушения при низких температурах. Основными видами внутренних дефектов, образующихся при сварке плавлением, являются трещины, непровары, пористость,

шлаковые и оксидные включения. Наличие этих дефектов особенно усложняет работу конструкций при низких температурах [6-8].

В настоящее время существует тенденция использования для оборудования высокопрочной 2,25Cr-1Mo-0,25V стали. Данная сталь имеет ряд преимуществ, для использования ее в качестве материала аппаратам пищевых и химических производств [9-12].

Целью данной работы было исследование зависимости механических свойств сварного соединения 2,25Cr-1Mo-0,25V стали от химического состава сварочных материалов и металла сварного шва при автоматической и ручной дуговой сварке (АДС и РДС). Для автоматической сварки использовались сварочные материалы с кодом ВА. Для ручной дуговой сварки были использованы материалы с кодом ВР.

Было изготовлено несколько сварных соединений (СС) методом автоматической дуговой сварки под флюсом (АДС) и ручной дуговой сварки (РДС).

Испытания и исследования проводились в двух термических состояниях:

1. В состоянии послесварочного отпуска минимальной продолжительности (PWHT min)  $660 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 2,0 - 2,5 час +  $705^{-5/+10}^\circ\text{C}$  в течение 7,0 – 7,5 час;
2. В состоянии послесварочного отпуска максимальной продолжительности (PWHT max) при температуре  $660 \pm 10^\circ\text{C}$  в течение 27,0 - 27,5 час + при температуре  $705^{-5/+10}^\circ\text{C}$  в течение 33,5 – 34,0 час.

В Программе испытаний учтены требования, предъявляемые к сварочным материалам [11]:

- Химический металла шва состав должен соответствовать требованиям таблицы 3.2 ASME Code секции VIII раздел 2 редакции 2010 года. Содержание цветных примесей должно соответствовать п.7.1 PVM-SU-5004-G
- Механические свойства металла шва в состоянии после PWHT min и PWHT max должны соответствовать свойствам основного металла.
- Уровень твердости сварного соединения в состоянии после PWHT min не должен превышать  $248 \text{HV}_{10}$ .
- В дополнение рассчитывается углеродный эквивалент металла для проб сваренных АДС и РДС. Углеродный – эквивалент суммарное содержание в стали углерода и пересчитанных эквивалентных ему количеств легирующих элементов, показывает влияния химического состава на свариваемость сталей.

$$C_3 = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15 \quad (3)$$

### Химический анализ

Химический анализ металла шва выполнялся следующими методами:

- фотоэлектрического спектрального анализа с помощью оптического эмиссионного спектрометра «SPECTROLAB»;

- рентгенофлуоресцентного анализа с помощью спектрометра «Axios Advanced»;
- атомно-абсорбционным методом с помощью спектрометра «AAAnalyst»;
- содержание остаточного водорода определялось методом нагрева в потоке инертного газа с помощью газового анализатора RH-402.

Результаты химического анализа металла сварочных материалов, шва СС, выполненных сварочными материалами для АДС и РДС, и основного металла представлены в табл. 1 и рис. 1.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1) химический состав металла швов, выполненных сварочными материалами для АДС и РДС, соответствует требованиям [11].

2) Содержание цветных примесей в металле шва, выполненном АДС и РДС, невелико. Уровень содержания остаточного водорода в металле шва, выполненном сварочными материалами для АДС и РДС можно считать приемлемым. Углеродный эквивалент посчитанный для металла шва для АДС и РДС равны 0,97 и 0,92 % соответственно.

Однако стоит отметить отличия конечного содержания Mn, в металле шва проб сваренными АДС и РДС. Данное отличие имеет место в металле сварных швов, при одинаковом содержании марганца в основном металле и различном содержании в сварочных материалах.

Следует учесть, что в сварочных материалах для АДС содержание марганца было изначально выше в чем сварочных материалах для РДС. При содержании в металле Mn > 1% вязкость бейнитных структур начинает снижаться, но до 1,5% Mn она не уменьшается ниже значений, наблюдаемых при его полном отсутствии. Влияние марганца на хладостойкость металла в значительной степени зависит от содержания в стали углерода [6, 7, 12-15]. Это связано с тем, что марганец в стали может находиться как в твердом растворе феррита, так и в виде карбида марганца  $Mn_3C$  или двойного карбида  $Mn_3C \cdot Fe_3C$ . В сталях с 1-2% Mn распределение его между карбидами и твердым раствором находится примерно в соотношении 1:4 [6, 7, 16-18].

Нужно, также, отметить различие в содержании Si: для АДС содержание этого элемента невелико (около 0,06%) в сварочных материалах и большее содержание в металле сварного шва (0,15%), в сварочных материалах РДС содержание кремния значительно больше (0,21%) а в металле шва значение практически идентично.

**Таблица 1. Химический состав металла проволоки сварочных материалов, швов, основного металла.**

Способ сварки	Код сварочных материалов	Номер пробы	Массовая доля элементов, %								
			C	Si	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo	P
		Требования ASME сек. VIII раздел 2	0,05-0,15	0,05-0,35	0,20-0,40	2,00-2,60	0,50-1,30	≤0,30	≤0,20	0,90-1,20	≤0,015
АДС	ВА	В010 А	0,05	0,19	0,25	2,32	1,0	0,04	0,07	0,94	0,005
		В040 А	0,07	0,13	0,26	2,38	1,16	0,04	0,07	0,97	0,005
		В050 А	0,07	0,13	0,25	2,39	1,16	0,04	0,07	1,01	0,005
РДС	ВР	В020 Р	0,08	0,20	0,26	2,23	0,85	0,03	0,03	0,97	0,007
Химический состав основного металла пробы			0,155	0,05	0,255	2,39	0,485	0,14	0,095	1,055	0,007
Химический состав сварочных материалов АДС (проволока)			0,09	0,06	0,261	2,38	1,28	0,02	0,02	1,04	0,003
Химический состав сварочных материалов РДС (наплавленный металл)			0,09	0,21	0,241	2,20	0,84	0,03	0,03	0,99	0,005

Способ сварки	Код сварочных материалов	Номер пробы	Массовая доля элементов, %								Х-фактор	К-фактор
			S	Nb	Sb	Sn	As	Pb	Bi			
		Требования ASME сек. VIII раздел 2	≤0,015	0,010-0,040	-	-	-	-	-	≤12	≤1,5	
АДС	ВА	В010 А	0,006	0,012	0,0003	0,0015	0,002	0,00015	0,00004	5,89	1,99	
		В040 А	0,002	0,012	0,0004	0,0014	0,0010	0,00010	0,00006	5,90	1,72	
		В050 А	0,004	0,012	0,0003	0,0012	0,0040	0,00016	0,00007	6,06	2,39	
РДС	ВР	В020 Р	0,004	0,015	0,0022	0,0020	0,0020	0,00013	0,00007	9,32	0,66	
Химический состав основного металла пробы			0,004	0,0355	0,00085	0,004	0,003	0,000105	0,000055	9,325	2,564	
Химический состав сварочных материалов АДС (проволока)			0,002	0,015								
Химический состав сварочных материалов РДС (наплавленный металл)			0,004	0,016	0,006	0,004	0,004					

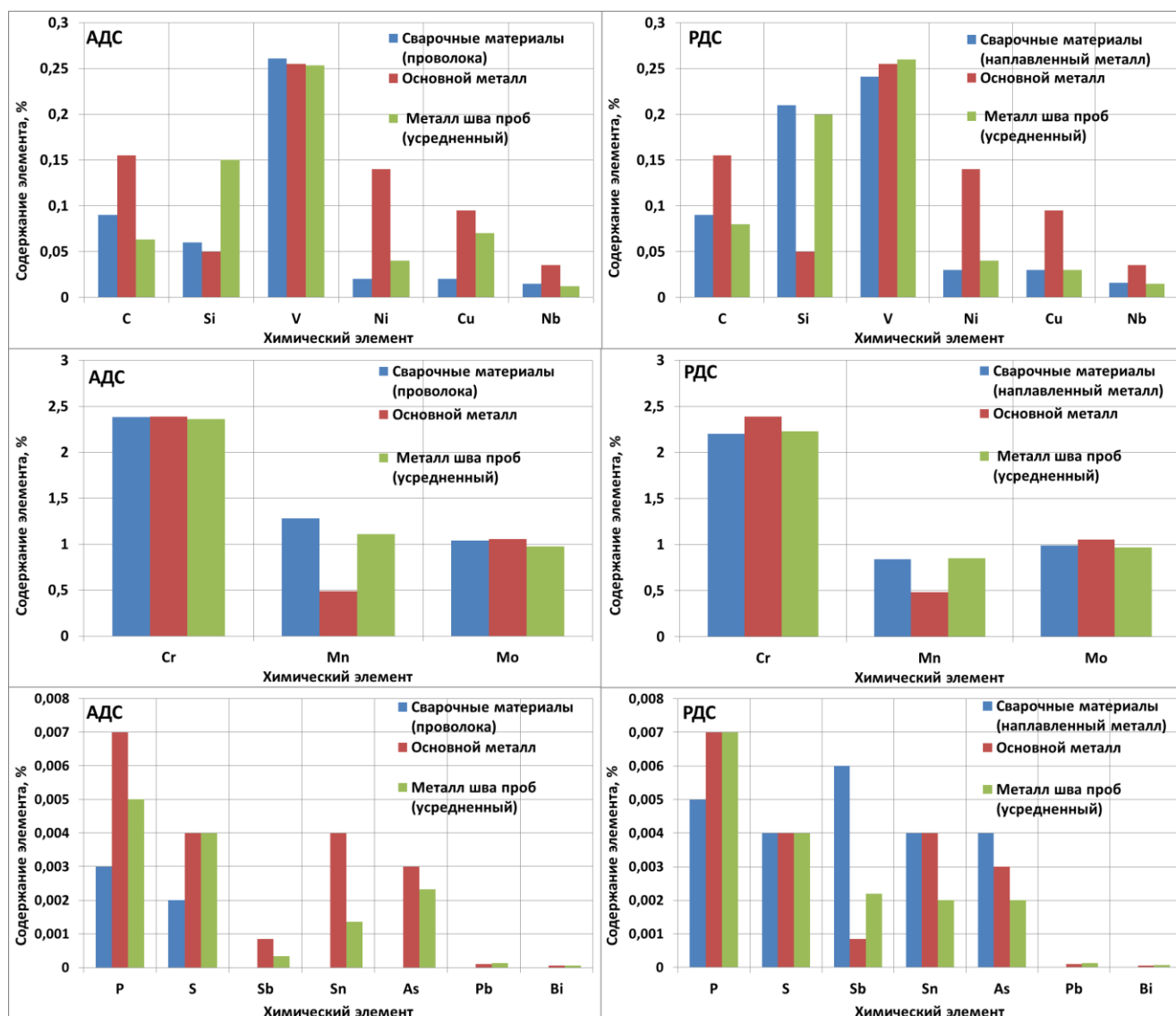


Рис. 1. Сравнения химического состава сварных материалов, металла шва сваренного данными материалами и основного металла сварного соединения для АДС и РДС

Все это при содержании Si в основном металле на уровне 0,05%. Кремний вызывает значительное искажение кристаллической решетки  $\alpha$ -Fe, что, с одной стороны, сильно повышает твердость и, следовательно, прочность бейнитных структур, а с другой увеличивает ее сопротивление движению дислокаций, препятствует релаксации высоких, упругих микронапряжений, повышая тем самым склонность к хрупкому разрушению. Поэтому увеличение содержания кремния  $> 0,6\%$  приводит к резкому снижению ударной вязкости бейнита при низких температурах. Кремний упрочняет бейнит в большей степени чем марганец. Марганец и кремний сравнительно слабо влияют на пластичность бейнитных структур [6, 7, 17-20].

Относительно оставшихся элементов: сварочные материалы ВА и ВР а также сваренные ими швы не имеют значительных отличий содержания, однако, сама их разница содержания в металле шва и основном металле может влиять на свойства сварного соединения, на что, так же указывает отличие углеродного эквивалента швов, сваренных различными материалами. Данные различия весьма невелики и химический состав металла швов, выполненных исследуемыми сварочными материалами, как и сварочные материалы с основным металлом, удовлетворяет требованиям нормативной документации.

### **Механические свойства металла сварного шва**

В ходе работы было проведено по 8 испытаний металла шва на растяжение при температуре 20 °С и 454 °С (температуры имитирующие возможные режимы работы аппаратов пищевых и химических производств) в состояниях РВНТ min и РВНТ max соответственно. Проведено около 60 испытаний металла шва на ударный изгиб при температурах -18 °С и -30 °С (температуры имитирующие возможные режимы работы аппаратов пищевых и химических производств в условиях низкой температуры окружающей среды) в состояниях РВНТ min и РВНТ max.

Был произведен замер твердости сварного соединения вдоль линий, указанных на рис. 2.

Металл шва, выполненный способом АДС сварочными материалами **ВА**:

- в состоянии РВНТ min (650-670 °С 2 час. 45 мин. + 700-715 °С 8 час. 00 мин.) имеет высокий уровень работы удара в поверхностном слое, в  $\frac{1}{2}$  и  $\frac{1}{4}$  толщине шва при температуре испытаний минус 18 °С (KV = 96,1÷160,9 Дж при требовании не менее 55 Дж). Значения работы удара при температуре испытаний минус 30°С менее стабильны, но тем не менее выше 55 Дж (KV = 66,7÷133,4 Дж) за исключением одного значения в  $\frac{1}{4}$  толщине шва (KV = 24,5 Дж). Уровень твердости металла шва и в зоне термического влияния (179÷223) не превышает 248 HV<sub>10</sub>;

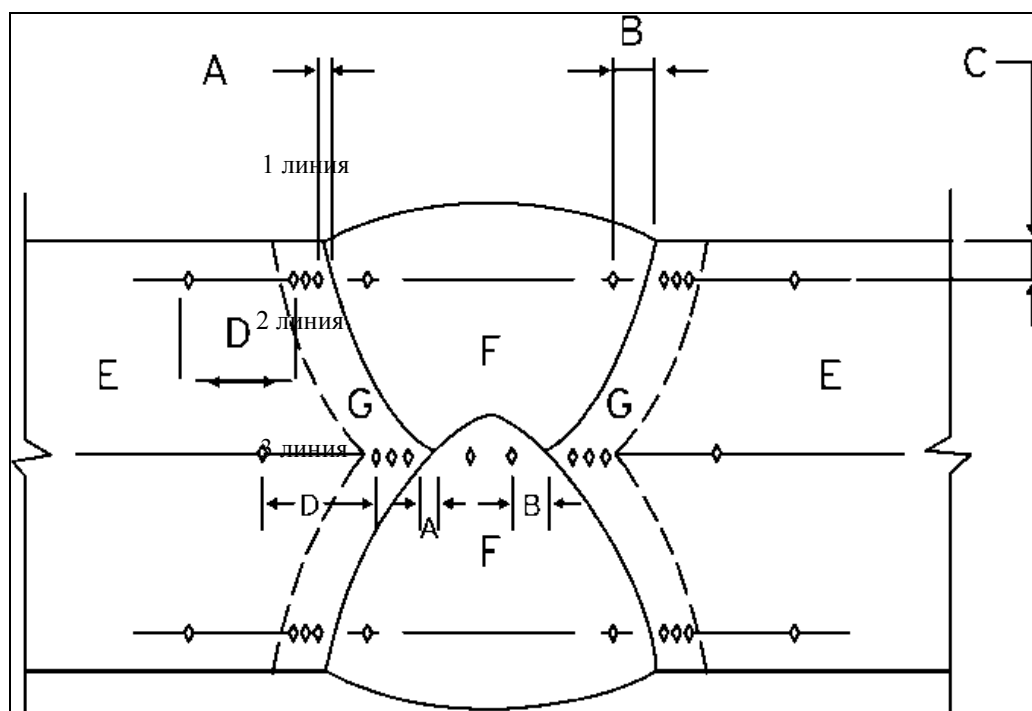


Рис. 2. Схема замера твердости СС:

- |                              |                                     |
|------------------------------|-------------------------------------|
| A - 8 миллов (0,2 мм)        | C - 0,04-0,08 дюйма (1-2 мм)        |
| B - 0,04-0,12 дюйма (1-3 мм) | D - 0,12-0,24 дюйма (3-6 мм)        |
| E - основной металл (ОМ)     | G - зона термического влияния (ЗТВ) |
| F - металл шва (МШ)          |                                     |

Анализ полученных результатов показал следующее:

- в состоянии РВНТ max (650-670 °С 27 час 10 мин + 700-710 °С 33 час. 48 мин.) результаты испытаний не соответствуют требованиям по уровню прочности при комнатной температуре ( $R_m = 570$  Мпа при требовании 585÷760 Мпа) и температуре испытаний 454°С ( $R_m = 460$  Мпа при требовании не менее 461 Мпа). Металл шва повторно выполненной пробы по уровню прочности также не соответствует требованиям ( $R_m^{20} = 555$  Мпа и  $R_m^{454} = 434$  Мпа, возможные режимы работы аппаратов пищевой и химической промышленности). Величина работы удара и твердости металл шва соответствует требованиям.

Металл шва, выполненный способом РДС сварочными материалами ВР:

- в состоянии РВНТ min (650-670°С 2 час 25 мин + 700-710 °С 7 час 40 мин) соответствует требованиям и имеет высокий уровень работы удара при минус 18 °С ( $KV = 144,2\div 152,1$  Дж) и минус 30°С ( $KV = 77,5\div 136,4$  Дж). Уровень твердости не превышает предельно допустимый 248 HV<sub>10</sub>;
- в состоянии РВНТ max (650-670 °С 27 час 15 мин + 700-710 °С 34 час 00 мин) результаты испытаний соответствует требованиям.

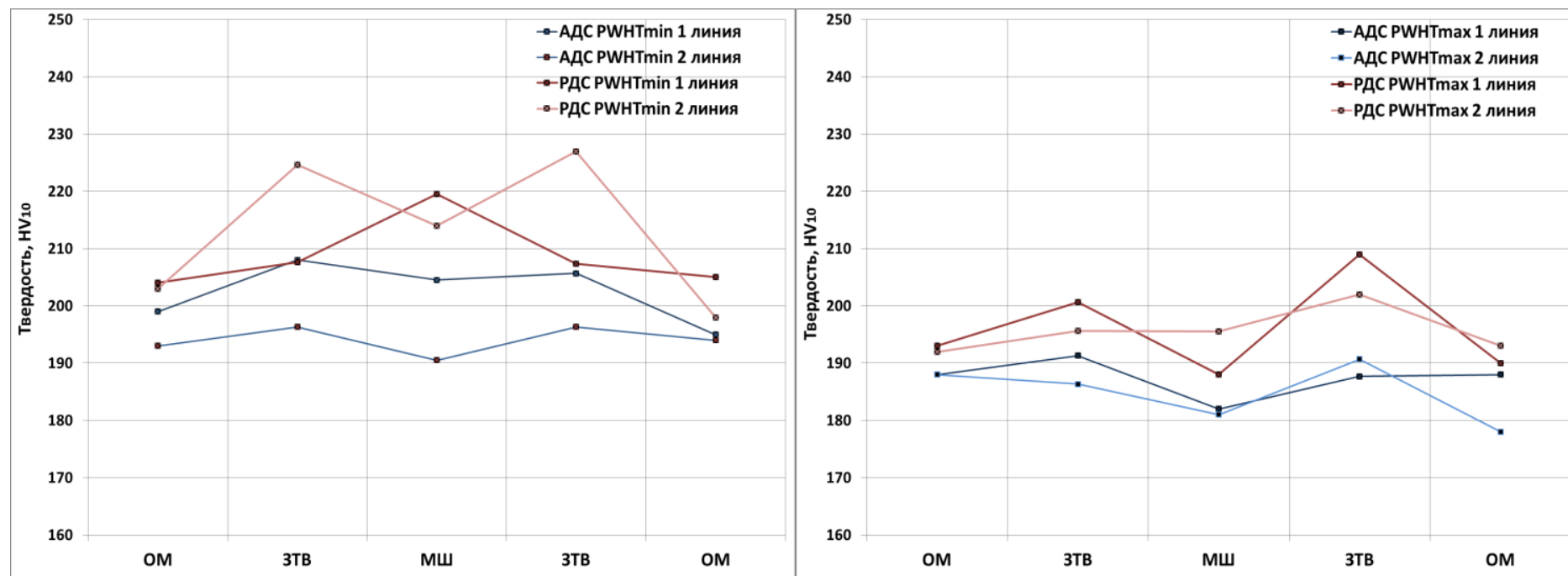


Рис. 3. Сравнение величин твердостей металла сварного соединения сваренного АДС и РДС, в термических состояниях PWHT min и PWHT max.



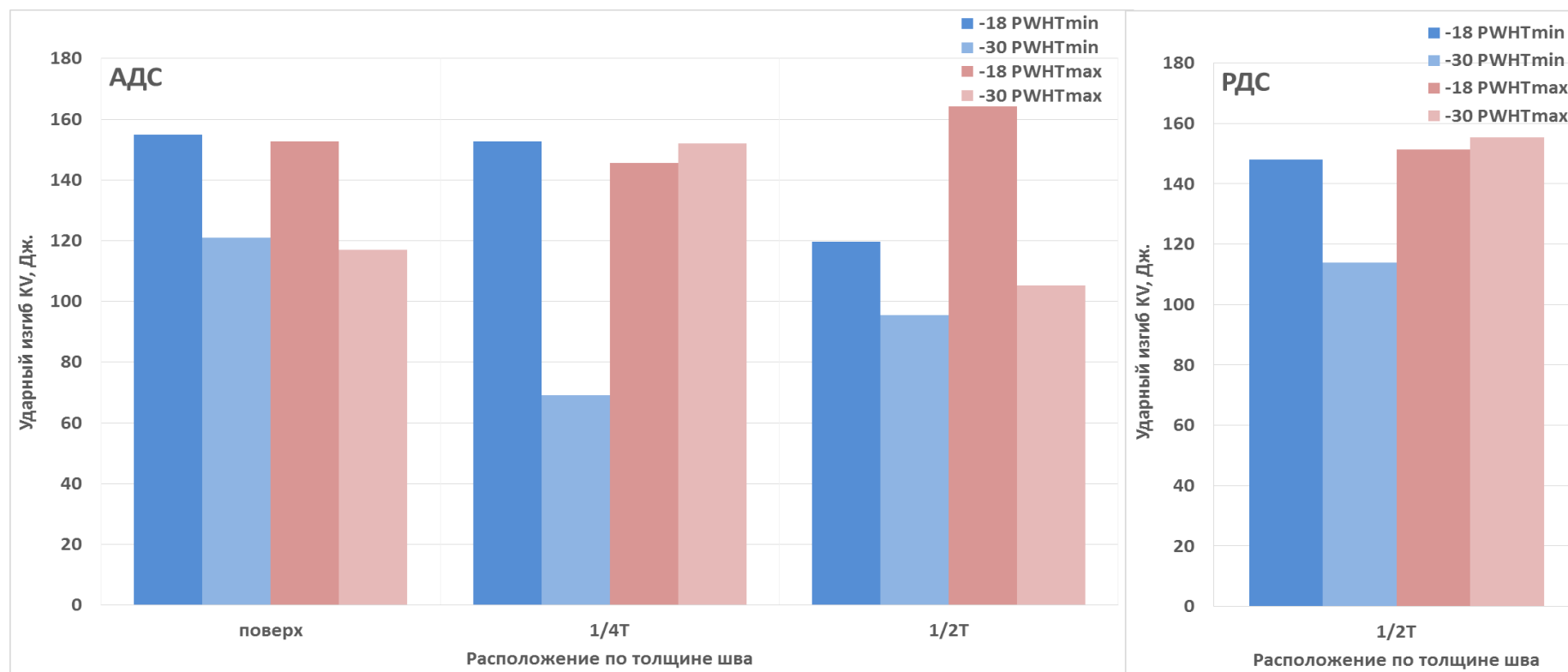


Рис. 4. Сравнение результатов испытаний на ударный изгиб KV, Дж.

### Выводы:

1. Химический состав металла швов, выполненных сварочными материалами ВА и ВР, соответствует требованиям, представленным в [11]. Содержание цветных примесей невелико в металле шва в пределах требуемых значений, для АДС и РДС. Содержание остаточного водорода в металле шва можно считать приемлемым, а разница в уровне остаточного водорода может быть связана не только с качеством сварочных материалов, но с тщательностью обращения с ними в процессе сварки СС.

2. Проведенные испытания и исследования показали, что сварочные материалы ВА и ВР при способе сварки АДС и РДС удовлетворяют требованиям предъявляемых к металлу шва [11] и обеспечивают заданный комплекс механических свойств.

3. Шов сваренный АДС в состоянии РВНТ тах не соответствуют требованиям по уровню прочности при комнатной температуре и температуре испытаний 454°C. Металл шва повторно выполненной пробы по уровню прочности также не соответствует требованиям, указанным в [11]. Данное несоответствие прочностных свойств прочности очевидно связано с колебанием содержания Mn на границе шов/основной металл.

### Список литературы

1. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.
2. Вологжанина С.А., Солнцев Ю.П., Жавнер В.Л., Горлач Р.В. *Материаловедение оборудования пищевых производств // Учебник. - С-Пб.: Профессия, 2003. - 526 с.*
3. Вологжанина С.А., Спынаки Т.Е. Особенности выбора и эксплуатации материалов в оборудовании пищевых производств // *Конструктор-машиностроитель. - 2008 г. № 3. - С. 34-37.*
4. Вологжанина С.А., Солнцев Ю.П., Иголкин А.Ф. *Материаловедение // Учебник. - М: Академия, 2013. - 496 с.*
5. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Жучков Д.В. Исследование материалов измельчительных комплексов пищевого оборудования // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 4.*
6. Солнцев Ю.П., Пирайнен В.Ю., Вологжанина С.А. *Материаловедение специальных отраслей машиностроения. – СПб.: Химиздат, 2007. – 784 с.*
7. Солнцев Ю. П., Титова Т. И. *Стали для Севера и Сибири. // СПб.: ХИМИЗДАТ, 2002. – 352.*

8. *Вологжанина С.А., Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С.* Работоспособность материалов низкотемпературного оборудования // Вестник международной академии холода. 2004. № 4. С.31-33.

9. *Г.П. Карзов, Г.Н. Филимонов, В.В. Цуканов, И.И. Грекова, П.А. Симонов,* Усовершенствование стали композиции Cr-Mo-V для изготовления высоконагруженных сосудов, применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности. // Прогрессивные материалы и технологии, 1999, №3, 25-27.

10. *Титова Т.И., Семернина И.Ф., Шульган Н.А., Милякова Л.А.* Определение стойкости материалов против теплового охрупчивания с применением метода «step cooling» // Тяжелое машиностроение - 2012, № 6. - С. 14-17.

11. *Титова Т.И., Шульган Н.А., Боровской А.С.* Современные требования, предъявляемые к сварочным материалам для сварки нефтехимических сосудов давления, изготавливаемых из стали типа легирования 2,25Cr-1Mo-0,25V. // "Сварочные материалы - 2012": доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции, 16–18 октября 2012 года. СПб.: Изд -во Политехн. ун -та, 2012. -XXX с.

12. *Титова Т.И., Семернина И.Ф., Шульган Н.А., Беньяминова Я.Ю., Боровской А.С.* Опыт изготовления заготовок из стали 2,25Cr-1,0Mo-0,25V применительно к нефтехимическому оборудованию для глубокой переработки нефти // Тяжелое машиностроение. - 2012, № 7. -С. 30-34.

13. *Вологжанина С.А., Ермакова Т.В. Солнцев Ю.П.* К вопросу о формировании зернограничных сегрегаций примесных атомов в сплавах Fe-C // Металлы. – 2004, № 2. – С. 86-94.

14. *Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф.* К вопросу об оценке состояния материала оборудования низкотемпературной техники // Вестник ИНЖЭКОНа, Выпуск 6(19). - 2007 г., с. 92-95.

15. *Вологжанина С.А., Ермаков Б. С., Солнцев Ю. П.* Влияние зернограничных сегрегаций примесных атомов на свойства углеродистых сталей промышленного производства // Деформация и разрушение материалов. – № 4, 2006. – с. 6-12.

16. *Андреев А.К., Ермаков Б.С.* Влияние легирующих элементов на трещиностойкость конструкционных сталей низкотемпературного назначения // Металлы. - 2010. - № 3. - С. 50-55.

17. *Андреев А.К., Ермаков Б.С.* Влияние термической обработки и микролегирования на хладноломкость сталей северного исполнения // Металлы. - 2010. - № 4. - С. 66-75.

18. *Шлякман Б.М.* Изменение механических свойств металлов при неизотермическом отпуске // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2012, № 12. - С. 3-8.

19. *Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., Пескишев С.А., Цветков А.С.* Повышение работоспособности сварных изделий из мартенситностареющей стали 03X11Н8М2Ф-ВД // Материалы всесоюзной научно-практической конференции, 11-12 октября 2012 г. - Якутск, 2012. - Т. 1. - С. 134-138. - 281 с. - ISBN 978-5-4223-0026-6.

20. *Андреев А.К., Ермаков Б.С., Слепцов О.И.* Роль химического состава в формировании свойств основного металла и зоны термического влияния сварных соединений хромоникелевых сталей // VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. ИФТПС СО РАН, Якутск. - Якутск: Ахсаан, 2013. - Т. 2. - С. 198-207.