

УДК 621.643.053:621.791

## К ВЛИЯНИЮ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Хафизова О.Ф.<sup>1</sup>, Болобов В.И.<sup>1</sup>, Файрушин А.М.<sup>2</sup>, Кузькин А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный горный институт  
им. Г.В.Плеханова (технический университет), г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>1</sup>e-mail: khafizova2005@yandex.ru, г. Уфа

**Аннотация.** На примере сварки элементов трубопровода из разнородных сталей 16ГС и стали 20 на стадии ремонта рассмотрена возможность применения вибрационной обработки в процессе сварочного цикла для улучшения механических свойств соединений и снижения негативного влияния различия физико-механических характеристик свариваемых сталей.

Приведена методика проведения экспериментальных исследований с описанием выбранных режимов сварки и сопутствующей обработки, представлены результаты испытаний сварных образцов на статическое растяжение, ударный изгиб, а также результаты металлографического исследования и замера твердости.

**Ключевые слова:** сварной шов, вибрационная обработка, механические свойства, микроструктура, термическая обработка, сварка трубопровода, разнородные сварные соединения

При модернизации и ремонте старых участков нефтегазопроводов часто возникает необходимость замены участка трубы из ранее использованного материала – это, как правило, низкоуглеродистая сталь, на другой – из легированной стали с изготовлением сварных соединений из материалов, существенно отличающихся по составу и физико-механическим свойствам. При этом резко возрастает негативное влияние сварочных процессов на качество сварного соединения: возрастает вероятность образования трещин в металле шва и появления в зоне сплавления участков со структурной неоднородностью, ведущей к ухудшению прочностных и пластических характеристик, наблюдается сильный рост остаточных напряжений в сварном шве и околошовной зоне основных металлов [1, 2]. Причем, указанное негативное влияние проявляется тем сильнее, чем в большей степени состав и физико-механические свойства свариваемых сталей отличаются друг от друга.

Для устранения негативного влияния процесса сварки на механические свойства разнородных сварных соединений используют, как правило, термиче-

скую обработку [3]. Так, при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов в случае сварки элементов трубопроводов из разнородных сталей, существенно отличающихся по прочностным свойствам (с разнородностью по классу прочности  $\Delta K \geq 80$  МПа), рекомендуется [4] проводить высокий отпуск, заключающийся в нагреве сварного соединения до температуры 575-600 °С, выдержке в течение часа и последующем охлаждении. Понятно, что такая термическая обработка является сложным и энергоемким процессом, трудно осуществимым в полевых условиях.

Альтернативным методом уменьшения негативного влияния сварочных процессов является вибрационная обработка свариваемых элементов, проводимая в процессе сварки. При этом, как показано, например, в [5], наибольшая эффективность виброобработки достигается при частотах вибрации, вызывающих резонансные колебания системы. В то же время в литературе не обнаружено сведений о применении вибрационной обработки для повышения качества сварных соединений из разнородных сталей.

В данной работе на примере сварки сталей 20 (класс прочности К42) и 16ГС (класс прочности К52) рассматривается возможность улучшения механических свойств разнородных сварных соединений путем их вибрации в процессе сварки с заданной частотой.

Выбор указанных материалов обусловлен тем обстоятельством, что углеродистая качественная сталь 20, отличающаяся сравнительной дешевизной и технологичностью, до недавнего времени являлась одним из основных трубопроводных материалов. В настоящее время в наибольших объемах при строительстве трубопроводов используются более прочные стали, типичным представителем которых является низколегированная кремнемарганцевая сталь 16ГС.

### **Методика эксперимента**

Объектом виброобработки являлись свариваемые пластины 500x120x10 мм (1 на рис. 1) из указанных сталей, жестко закрепленные на крышке сварочного стола (7) с ножками из стального швеллера, вмонтированными в основание.

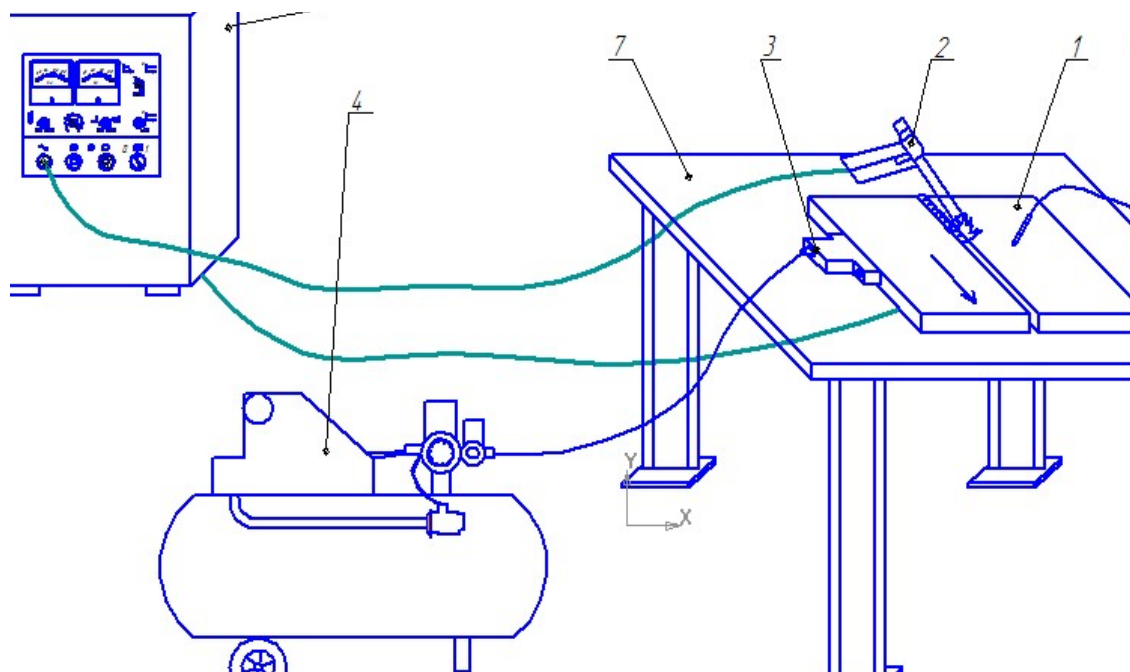


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – свариваемые пластины из разнородных сталей; 2 – электрододержатель;  
 3 – виброустройство; 4 – компрессор; 5 – выпрямитель сварочный;  
 6 – виброанализатор; 7 - сварочный стол

Пластины после V-образной разделки кромок сваривались встык методом ручной электродуговой сварки на постоянном токе обратной полярности ( $I = 70 \dots 90$  А,  $U = 22 \dots 26$  В) с использованием сварочного аппарата ВДУ-250. Сварка выполнялась в 3 прохода: корень шва – электродами Э50А-ОГПЭ-01 ( $d = 2,5$  мм), облицовочные слои – Э50А-УОНИИ-13/55 ( $d = 4$  мм) с материалом сварочной проволоки для обоих электродов – Св-08.

В качестве источника вибрации (3) было использовано пневматическое вибрационное шаровое устройство ВШ-10, работающее от компрессора (4), способное вызывать колебания в интервале частот от 50 до 200 Гц. Частота виброперемещений системы  $\nu$  и амплитуда  $a$  в направлении, перпендикулярном оси сварного шва, измерялись с помощью виброанализатора спектра CSI VA1900 (6).

Сварка пластин в экспериментах осуществлялась с вибрационной обработкой с параметрами, указанными в табл. 1, а также для сравнения и без вибрационной обработки.

Таблица 1. Режимы обработки свариваемых пластин

Режимы	Частота вибрации $\nu$ , Гц	Амплитуда вибрации $a$ , мкм
Без вибрационной обработки	-	-
С вибрационной обработкой	50	8,8
С вибрационной обработкой	100	0,3
С вибрационной обработкой	170	0,6

Поскольку, как было найдено в [5], вибрация сварных соединений наиболее эффективна в условиях резонанса, использованные частоты виброобработки пластин сопоставляли с расчетной величиной первой собственной частоты  $\nu^*$  колебаний системы.

Для определения  $\nu^*$  рассчитывали жесткость системы  $f$  – коэффициент пропорциональности между величиной внешней силы, приложенной к пластинам и крышке стола, и величиной их перемещения в точке приложения данной силы относительно неподвижного основания. Задача решалась двумя способами: аналитически и численно. В обоих случаях сварной стол с закреплёнными на нём свариваемыми пластинами рассматривался как рама, состоящая из балок Бернулли-Эйлера, нагруженная сосредоточенной единичной силой. При аналитическом решении использовался подход, основанный на применении теоремы Кастильяно [6]. Численное решение проводилось в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Полученные двумя способами значения жесткости совпали:  $f = 2,95$  МН/м. С учетом суммарной массы стола и пластин ( $m_{\Sigma} = 152$  кг) значение первой собственной частоты колебаний системы оказалось равным

$$\nu^* = (f/m_{\Sigma})^{0,5} / 2\pi = 22 \text{ Гц} .$$

Полученные разнородные сварные соединения разрезали в поперечном относительно сварного шва направлении на полосы, из которых в соответствии с требованиями [7] изготавливали соответствующие образцы для физико-механических испытаний (по 3 образца на каждый вид испытаний). Анализировали влияние виброобработки с той или иной частотой на прочностные характеристики ( $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_B$ ), твердость (HV), ударную вязкость (KCV) и микроструктуру металла шва и околошовной зоны обеих сталей сварного соединения.

Прочностные характеристики определяли [8] при статическом растяжении плоских образцов до разрыва на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 усилием 100 кН.

Испытания на ударный изгиб в соответствии с требованиями [9] по испытанию трубопроводных сталей проводили при температуре минус 20 °С на образцах 5 видов, отличающихся местом нанесения V-образного надреза (местом удара): по оси сварного шва, а так же на расстоянии 11 мм (в зоне термического влияния) и 24 мм (вне зоны сварки) с обеих его сторон.

Микротвердость и микроструктуру различных зон сварного соединения анализировали с использованием универсального твердомера Zwick/Roel ZHU и микроскопа Zeiss Observer. Обработку результатов микроструктурного анализа производили с помощью программного комплекса Tixomet.

### Результаты экспериментов и обсуждение

Ударную вязкость и микротвердость различных зон сварного соединения в зависимости от частоты виброобработки в процессе сварки иллюстрируют гистограммы, представленные на рис. 2.

Как следует из гистограммы рис. 2 применение вибрационной обработки повышает ударную вязкость как металла сварного шва, так и зоны термического влияния обеих сталей. Причем наибольший эффект (рост KCV металла сварного шва до 105 %) достигается при частоте вибрационной обработки 50 Гц, наиболее приближающейся к частоте собственных колебаний системы ( $\nu^* \sim 22$  Гц). Как следует из сравнения значений KCV различных зон сварного соединения, ударная вязкость материала в зоне термического влияния более прочной стали (16ГС) для всех режимов обработки превышает величину KCV обеих сталей вне зоны сварки. Аналогичным образом виброобработка влияет и на твердость различных зон сварного соединения. При этом если для ЗТВ менее прочного материала (стали 20) она мало влияет на HV, то для зоны термического влияния более прочного материала (16ГС) и сварного шва величина HV с применением виброобработки существенно возрастает.

Результаты микроструктурного анализа материала в средней части сечения сварного шва представлены на рис. 3.

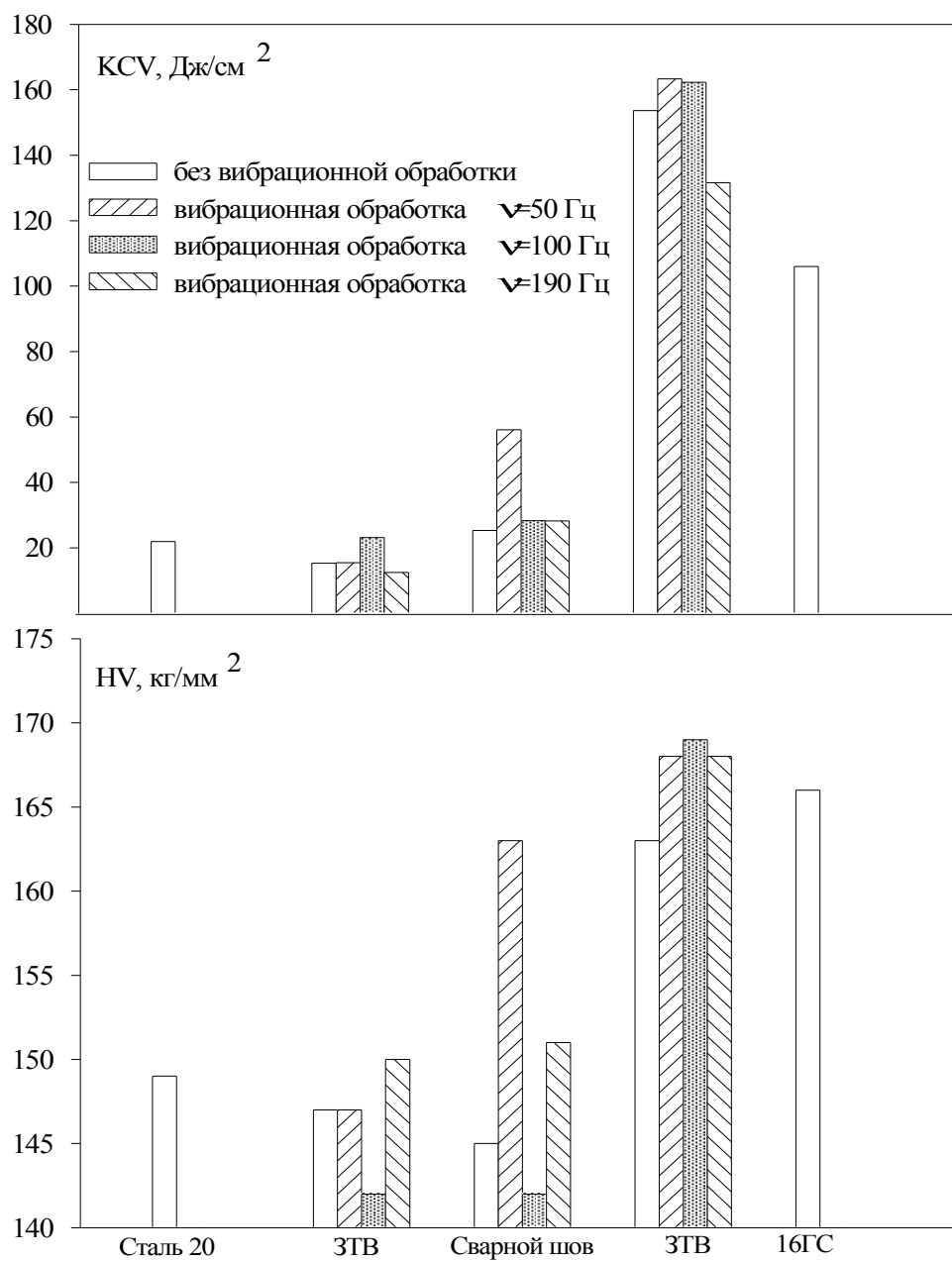


Рис. 2. Зависимости ударной вязкости KCV и твердости HV металла шва и зон термического влияния ЗТВ разнородного сварного соединения от вида обработки

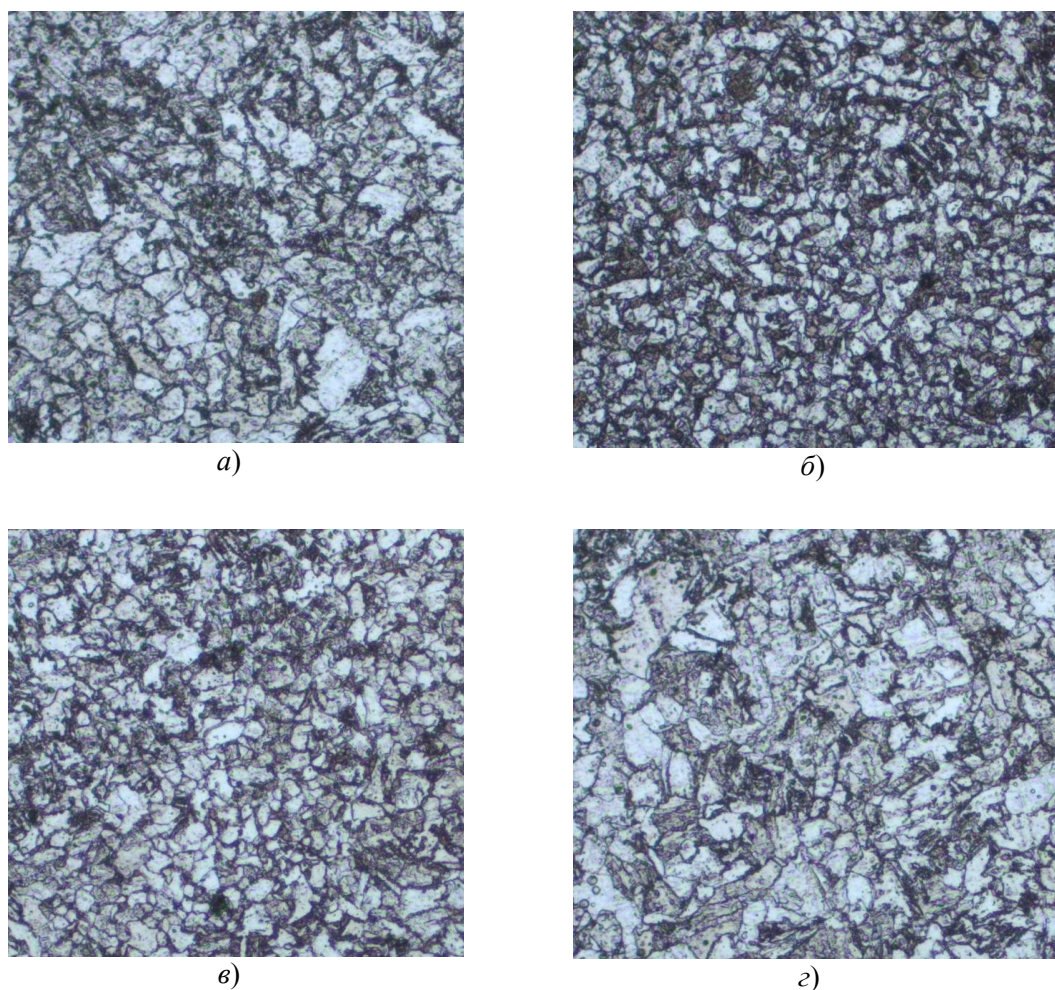


Рис. 3. Микроструктура сварного шва, х300:  
без виброобработки (а); с виброобработкой  $\nu = 50$  Гц (б);  
 $\nu = 100$  Гц (в);  $\nu = 190$  Гц (г)

Из фотографий микроструктуры видно, что при наличии во всех сварных швах феррито-перлитной структуры применение виброобработки более низкой частоты (50 и 100 Гц) способствует измельчению зерна (рис. 4). На частоте 190 Гц структура практически не отличается от исходной (без виброобработки).

Результаты испытаний образцов на растяжение (рис. 5) показали, что применение виброобработки приводит к увеличению условного предела текучести ( $\sigma_{02}$ ) при практически неизменной величине предела прочности ( $\sigma_B$ ) металла сварного шва.

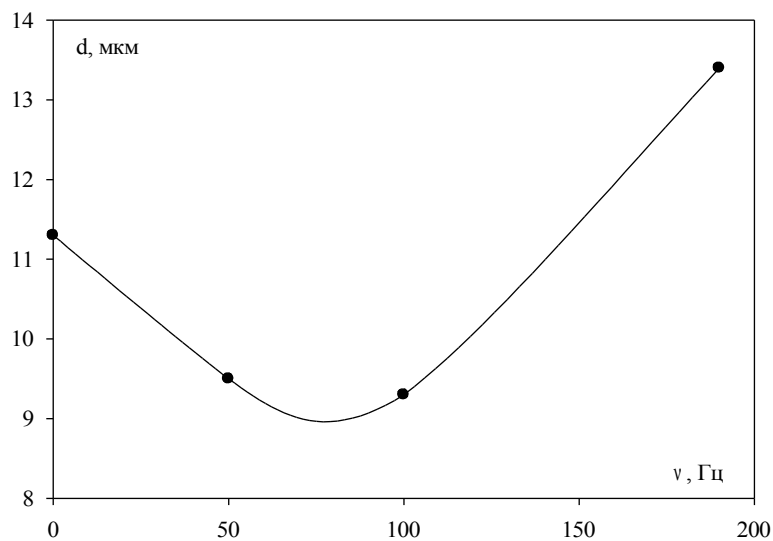


Рис. 4. Зависимость среднего размера зерна металла сварного шва  $d$  от частоты вибрационной обработки  $\nu$

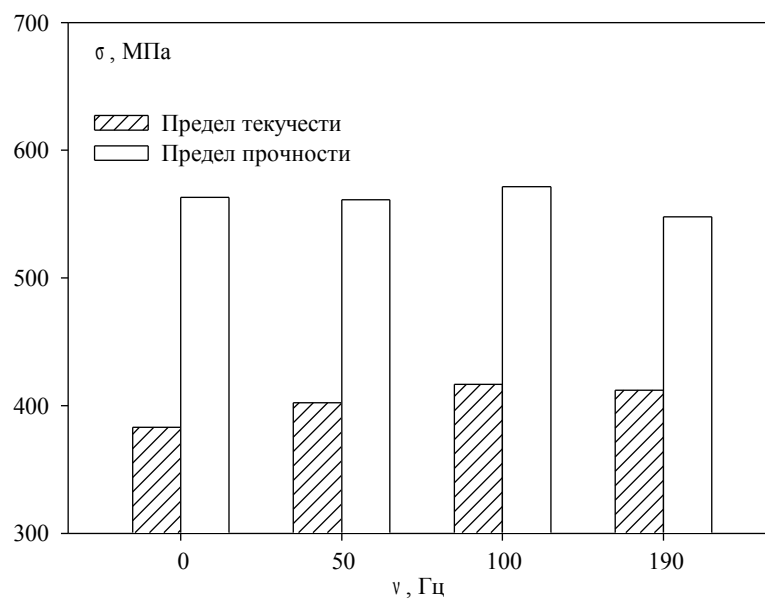


Рис. 5. Прочностные характеристики ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ) металла сварного шва в зависимости от частоты виброобработки  $\nu$

Как следует из результатов экспериментов, применение виброобработки в процессе сварки положительно влияет на физико-механические свойства материалов в различных зонах сварного соединения из разнородных сталей, увеличивая их ударную вязкость и предел текучести. Причём наибольший эффект достигается при частоте виброобработки (~50 Гц), из приведенного перечня 50, 100, 190 Гц, наиболее близкой к частоте собственных колебаний системы, что можно объяснить максимальной амплитудой колебаний ( $a \sim 8,8$  мкм), возникающей при этой частоте и, как следствие, максимальными дополнительными напряжениями в металле.

Другой причиной улучшения механических свойств сварного шва является измельчение зёрен металла, образующихся в процессе кристаллизации, под действием колебаний. При этом изменение предела текучести материала находится в соответствии с законом Холла-Петча.

### **Выводы**

Исходя из результатов проведенных экспериментов по сварке разнородных сталей 20 и 16ГС с сопутствующей вибрационной обработкой, можно сделать вывод о том, что применение вибрационной обработки в процессе сварки благоприятно влияет на механические свойства сварного соединения, повышая его ударную вязкость в металле сварного шва до 105 % при частоте вибрации 50 Гц, наиболее приближающейся к частоте собственных колебаний системы ( $\nu^* \sim 22$  Гц), твердость – на 13 %, приводит к увеличению условного предела текучести и улучшению микроструктуры металла сварного шва и зон термического влияния.

### **Литература**

1. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей. М.: Машиностроение, 1966. 232 с.
2. Закс И.А. Сварка разнородных сталей. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1973. 208 с.
3. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. М.: Машиностроение. 1973. 213 с.

4. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть I.

5. Полнов В.Г., Сагалевиц В.М., Могильнер М.Н. Влияние собственных колебаний сварных конструкций на устранение в них остаточных напряжений вибрацией // Сварочное производство. 1988. №4. С. 37-39.

6. Мельников Б.Е., Павлов П.А., Паршин Л.К. Сопротивление материалов. С-Пб.: Лань, 2007. 560 с.

7. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

8. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

9. ГОСТ 9454-78. Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах.

## INFLUENCE OF VIBROMECHANICAL TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF DISSIMILAR WELDED JOINTS

O.F. Khafizova<sup>1</sup>, V.I. Bolobov<sup>1</sup>, A.M. Fairushin<sup>2</sup>, A.U. Kuzkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Mining Institute, Sankt-Peterburg, Russia

<sup>2</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

<sup>1</sup>e-mail: khafizova2005@yandex.ru,

**Abstract.** *The article describes opportunity of applying vibration during the welding cycle by way of example pipelines pieces welding in repair work with dissimilar steels 16ГC and 20 to improve mechanical properties and decrease negative impact of differences physical-mechanical properties of welded steels.*

*The methodology of experimental studies with a description of the selected modes of welding and accompanying processing, the results of tests for static stretching, impact strength, also metallurgical study and hardness measurement of welded samples are presented.*

**Keywords:** *weld seam, vibromechanical treatment, mechanical properties, microstructure, thermal treatment, pipeline welding, dissimilar welded joint*

### References

1. Zemzin V.N. Svarnye soedineniya raznorodnykh staley (The welded joints of dissimilar steels). Moscow, Mashinostroenie, 1966. 232 p.
2. Zaks I.A. Svarka raznorodnykh staley. Spravochnoe posobie (Welding dissimilar steels. Handbook). Leningrad, Mashinostroenie, 1973. 208 p.
3. Vinokurov V.A. Otpusk svarnykh konstruksii dlya snizheniya napryazhenii (Tempering weldments to reduce stress). Moscow, Mashinostroenie, 1973. 213 p.
4. STO Gazprom 2-2.2-136-2007. Instruksiya po tekhnologiyam svarki pri stroitel'stve i remonte promyslovykh i magistral'nykh gazoprovodov. Chast 1 (Instruction for welding technologies in construction and repair of field gathering and trunk gas pipelines. Part I).
5. Polnov V.G., Sagalevich V.M., Mogil'ner M.N. Vliyanie sobstvennykh kolebaniy svarnykh konstruksii na ustranenie v nikh ostatochnykh napryazhenii vibratsiei (Effect of natural oscillations of welded structures to elimination of residual stresses vibration). *Svarochnoe proizvodstvo*, 1988, Issue 4, p. 37-39.
6. Mel'nikov B.E., Pavlov P.A., Parshin L.K. Soprotivlenie materialov (Strength of Materials). Sankt-Peterburg, Lan', 2007. 560 p.

7. GOST 6996-66. Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv (Welded joints. Methods of mechanical properties determination).

8. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie. (Metals. Methods of tension test).

9. GOST 9454-78. Metally. Metody ispytaniy na udarnyi izgib pri ponizhennoi, komnatnoi i povyshennykh temperaturakh (Metals. Method for testing the impact strength at the low, room and high temperature).