

УДК 621.791.16

**А.В. Файзуллин**, аспирант, **А.М. Файрушин**, канд. техн. наук, **Д.В. Каретников**, канд. техн. наук, **М.З. Зарипов**, канд. техн. наук, **М.Р. Фаткуллин**, студент.  
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия  
Тел.: +79174103303; E-mail: [marat.fatkullin1@gmail.com](mailto:marat.fatkullin1@gmail.com)

## РЕМОНТ КОРПУСОВ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ИЗ СТАЛИ 20ХГСФЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Для изготовления корпусов машин и агрегатов (насосов, компрессоров, гидравлических коробок и т.д.), используемых в нефтегазовой отрасли, широко применяется низколегированная литейная сталь феррито-перлитного класса марки 20ХГСФЛ. Одной из острых задач, касающихся повышения качества машин и агрегатов, является совершенствование технологии ремонта корпусов, изготовленных из литейных сталей.*

*В данной работе с применением метода конечного элемента в программном комплексе ANSYS был произведен анализ напряженно-деформированного состояния в модели сварного соединения, имитирующего корпус машины, рассмотрена и реализована технология проведения ремонта с применением ультразвуковой обработки шва и сопутствующего охлаждения, выполнены исследования механических свойств, микро- и макроструктуры.*

**Ключевые слова.** Ремонт корпусов машин, сварка литейных сталей, оценка напряженно-деформированного состояния, сварочные напряжения, механические свойства, сварное соединение, ультразвуковая обработка.

### 1. Введение

В настоящее время одной из наиболее важных проблем в развитии нефтяного машиностроения являются повышение работоспособности машин и аппаратов, а также экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Одной из острых задач, касающихся повышения качества ремонта машин и агрегатов, является совершенствование технологии ремонта с применением ручной электродуговой сварки. Электродуговая сварка и наплавка на сегодняшний день является практически единственным применимым способом, используемым при ремонте нефтегазопромыслового оболочкового оборудования, машин и агрегатов [1].

Термодеформационные процессы и фазовые превращения, происходящие в сварном соединении, являются причиной возникновения значительных остаточных напряжений, которые приводят к искажению формы сварных конструкций, потере прочности, снижению коррозионной стойкости металла, что негативно сказывается на работоспособности оборудования. Особенно ярко это проявляется при ремонте толстостенного оборудования, свыше 30 мм.

На текущий момент для ремонта корпусов машин, агрегатов, гидравлических коробок из среднеуглеродистой стали 20ХГСФЛ используется традиционная технология ремонта с применением ручной дуговой сварки электродами типа Э50А, Э60 марки УОНИ 13/55, УОНИ 13/65 с сопутствующим подогревом дефектного участка и последующим высокотемпературным отпуском. Как показывает практика, данная технология ремонта дефектного участка имеет низкую производительность, сложность ведения процесса термической обработки, что часто приводит к возникновению трещин как в сварном шве,

так и в зоне термического влияния. После ремонта корпуса сварные соединения довольно быстро выходят из строя, трещины по зоне сплавления с основным металлом появлялись в первые месяцы после ремонта (рисунок 1).



Рис. 1. Трещина в околошовной зоне сварного соединения после ремонта корпуса насоса

Анализируя работоспособность оборудования до и после проведения ремонта, можно предположить, что одной из основных причин преждевременных разрушений сварных конструкций из сталей марки 20ХГСФЛ после ремонта является высокий уровень остаточных сварочных напряжений в металле сварного соединения, фазовые изменения и низкая эффективность существующей технологии снятия напряжений термической обработкой. Применение же операций подогрева перед сваркой способствует росту участка перегрева в околошовной зоне и соответственно охрупчиванию данного металла, что дополнительно может являться причиной хрупкого разрушения металла по зоне термического влияния (рисунок 1) [2].

Задача определения остаточных сварочных деформаций и напряжений в стыковом соединении из стали марки 20ХГСФЛ была решена численным моделированием с применением метода конечных элементов.

Модель для численного исследования принимали соответствующую реальным конструкциям. Форма выборки дефектов корпуса для последующей заварки (рисунок 2) была выбрана в соответствии с инструкцией по ремонту корпусов машин.

Первоначально был выполнен тепловой, а затем конструкционный анализ поведения материала образца при остывании сварного шва с температуры окончания сварки. Элемент модели для численных исследований соответствовал среднелегированной стали 20ХГСФЛ. Размеры модели принимались равными: ширина – 130, длина – 150, толщина – 35 мм. Металл сварного шва был принят по свойствам, аналогичным основному металлу.

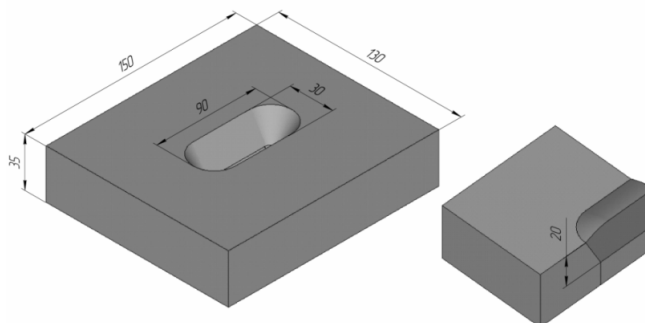


Рис. 2. Размерная модель образца

На стадии теплового анализа выполнялось моделирование охлаждения сварного шва и определение изменения температуры по объему образца. При построении конечно-элементной сетки геометрической модели был использован изопараметрический линейный восьмиузловой конечный элемент (рисунок 3).

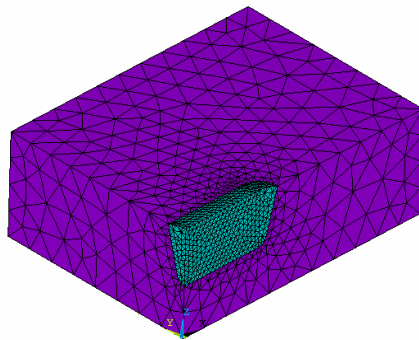


Рис. 3. Конечно-элементная модель четверти заваренного образца

При моделировании процесса остывания сварного шва предполагалось, что теплопередача в окружающую среду осуществлялась за счет конвективного теплообмена поверхности шва и образца с воздухом.

Начальная температура сварного шва была задана равной  $1600^{\circ}\text{C}$ , температура окружающей среды -  $20^{\circ}\text{C}$ .

В результате температурного анализа были получены распределения температуры по всей модели, изменения температурных полей в ходе остывания сварного шва.

Так как толщина металла имеет значительные размеры, то в зоне термического влияния формируется достаточно объемная прослойка металла, склонная к росту зерна в результате перегрева при температурах выше  $900^{\circ}\text{C}$ .

При конструкционном анализе изменения температурных полей, полученные в результате температурного анализа, были приложены к модели как нагрузка. В результате расчетов выявили распределение эквивалентных напряжений при моделировании заварки трещины в образце из стали 20ХГСФЛ (рисунок 4).

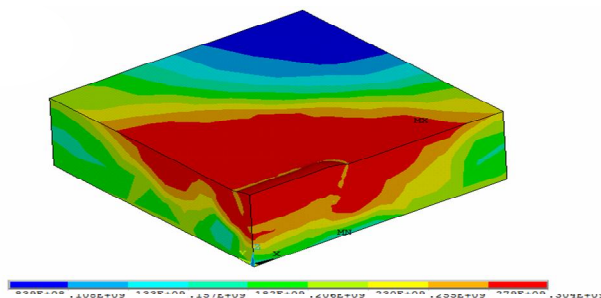


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений, МПа

Данное исследование показало, что наибольшая концентрация напряжений и деформаций возникает в зоне сварного шва и зоне сплавления. Учитывая изменение свойств металла зоны термического влияния, остаточные сварочные напряжения могут привести к искажению формы конструкции в случае её недостаточной жесткости и

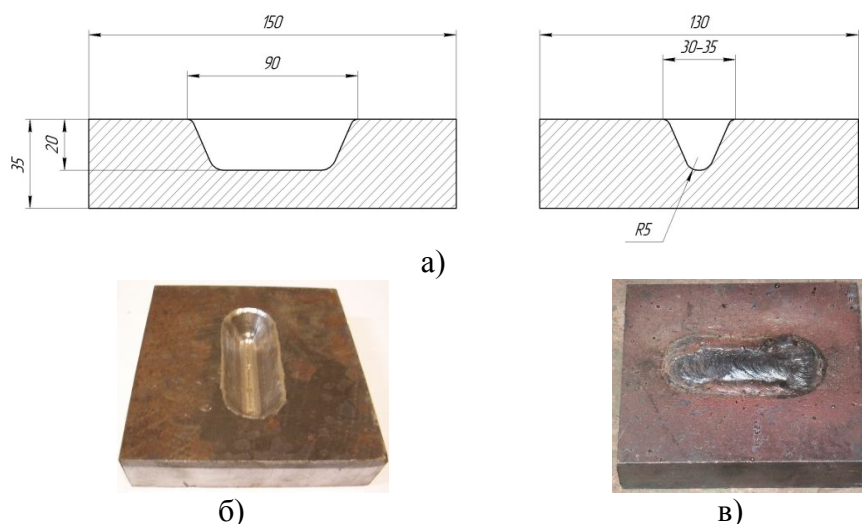
преждевременному разрушению при его эксплуатации. Также сварочные напряжения оказывают негативное влияние на коррозионную стойкость сварных соединений [3].

Исходя из полученных данных, необходима такая технология сварки, при которой с одной стороны ЗТВ будет минимальной, а с другой остаточные напряжения в ЗТВ будут меньше предела текучести основного металла. Предлагаемая нами технология сварки заключается в использовании ультразвуковой обработки и сопутствующего охлаждения во время сварки, представленная на рисунке 5. Сопутствующее охлаждение в процессе сварки создаст закалочные структуры в сварном шве, а также позволит значительно снизить зону термического влияния и исключить рост зоны перегрева. Последующий слой с ультразвуковой обработкой металла шва будет служить отжигающим валиком для предыдущего, при этом за счет использования обработки ультразвуком будет иметь повышенную пластичность и меньший уровень внутренних напряжений [4].



Рис. 5. Технология сварки с применением сопутствующего охлаждения и ультразвуковой обработки

Для подтверждения предложенной технологии была произведена реальная заварка образца. На образце из стали 20ХГСФЛ выполняли паз, имитирующий ремонт дефектного участка (рисунок 6). Первый образец был заварен по существующей технологии, с подогревом и последующей термообработкой, второй по предлагаемой нами схеме. Сварка производилась на постоянном токе обратной полярности, электродами марки УОНИ 13/55. Ультразвуковая обработка шва производилась с помощью комплекса «Шмель», охлаждение сварного шва производилось путем подачи распыленной струи воды со стороны корневого шва.



а – схема подготовки образца; б – образец перед заваркой; в) заваренный образец

Рис. 6. Образцы для проведения экспериментов

Для определения ширины зоны термического влияния были проведены исследования макроструктуры согласно РД 24.200.04-90 «Швы сварных соединений. Металлографический метод контроля основного металла и сварных соединений химнефтеаппаратуры».

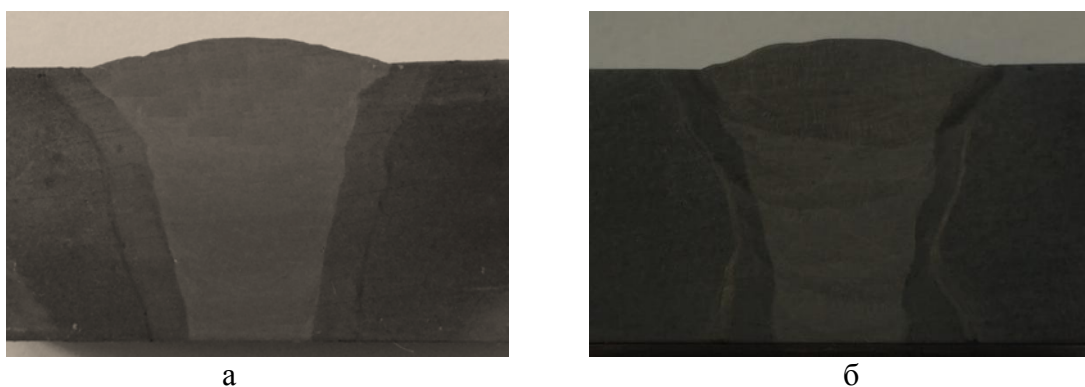


Рис. 7. Макроструктура сварного соединения стали 20ХГСФЛ:  
а) без сопутствующей обработки; б) с УЗО и сопутствующим охлаждением

ЗТВ сварного шва выполненного без обработки (рис. 7, а) больше чем ЗТВ сварного шва выполненного с УЗО и сопутствующим охлаждением (рис. 7, б). Соответственно сварной шов выполненный с применением УЗО и сопутствующим охлаждением имеет меньшую склонность к образованию холодных трещин.

С целью определения микротвердости сварного соединения были проведены ряд замеров перпендикулярно оси шва. Измерения микротвердости производились микротвердомером ПМТ-3. Видно, что ЗТВ сварного соединения с УЗО и сопутствующим охлаждением (рис. 8) во время сварки меньше, чем ЗТВ без обработки (рис. 9). Следовательно, вероятность образования холодных трещин в таких соединениях меньше из-за меньшей протяженности хрупкой прослойки.

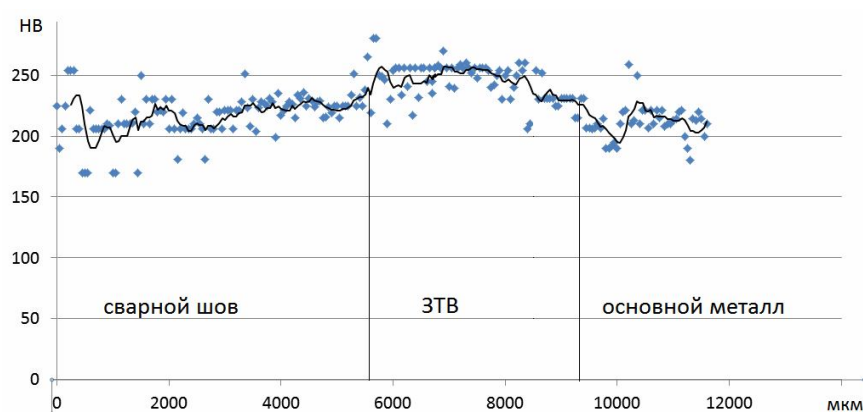


Рис. 8. Твердость перпендикулярно оси шва выполненного с УЗК и сопутствующим охлаждением



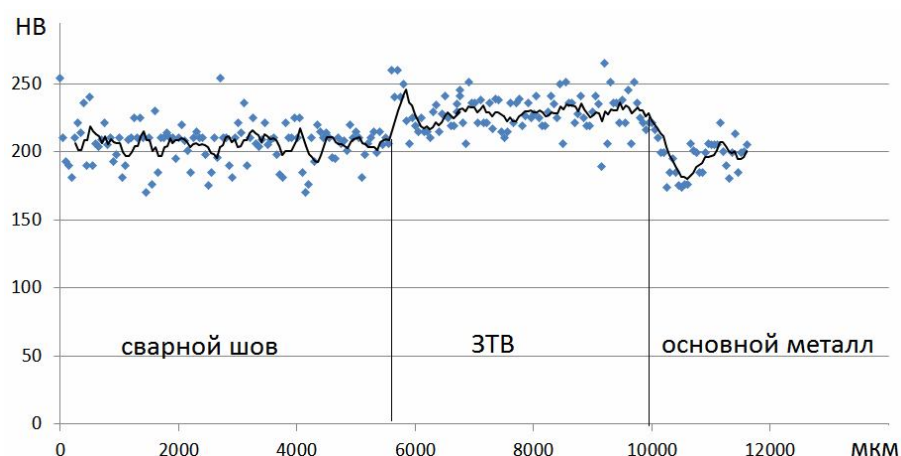


Рис. 9. Твердість перпендикулярно осі зварного шва виконанного без супутньої обробки

Для того, чтобы понять как влияет предложенная технология сварки на величину зерна была исследована микроструктура сварного соединения. Для этого контролируемая поверхность сварного шва для определения микроструктуры после травления для определения макроструктуры была подвергнута обработке шлифовальным кругом на плоскошлифовальном станке с обязательным охлаждением эмульсией. Травление микрошлифа производилось химическим способом в реактиве до четкого выявления микроструктуры металла шва, зоны термического влияния и основного металла. Выявление микроструктуры химическим осуществлялось методом протирки контролируемой поверхности ватным тампоном, пропитанным реактивом. В качестве реактива использовался 4% раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте [5].

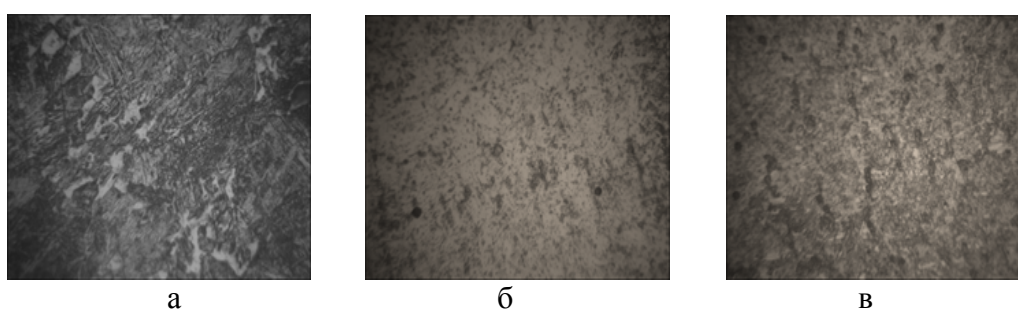


Рис. 10. Микроструктура сталі 20ХГСФЛ:

а) участок основного металла; б) участок шва при сварке с применением УЗО и сопутствующего охлаждения; в) участок шва при сварке с последующей термообработкой

Очевидно, что величина зерна сварного соединения, подвергнутого УЗО и сопутствующему охлаждению (рис. 10, б), значительно меньше, чем величина зерна основного металла (рис. 10, а) и меньше, чем при сварке с последующей термообработкой (рис. 10, в) что свидетельствует о более лучших механических свойствах.

## 2. Заключение

Таким образом, предложенная нами технология сварки, которая заключается в комбинировании сопутствующего охлаждения и ультразвуковой обработки сварного шва позволяет значительно повысить производительность ремонтных работ, улучшить механические свойства сварного соединения за счет снижения размера зоны термического влияния.

## Список литературы:

1. Карпов А.Л. Совершенствование технологии изготовления конструктивных элементов аппаратов из стали 09Г2С с применением локальной виброобработки. Диссертации по теме «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)», 2007. 4 стр.
2. Технологическая инструкция по ручной электродуговой сварке изделий из малоуглеродистых закаливающихся сталей типа 15Х5М с сопутствующим охлаждением без термической обработки / А.В. Бакиев [и др.]. Уфа: ВНИИПТхимнефтеаппаратуры, 1982. С. 26.
3. Файзуллин А.В., Файрушин А.М., Каретников Д.В., Фаткуллин М.Р. Ремонт корпусов насосных агрегатов из стали 20ХГСФЛ с применением сварочных технологий // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2014. №1. С.345-361.
4. Эльдарханов А.С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. М.: СП Интербук, 1996. 256 с.
5. РД 24.200.04-90. «Швы сварных соединений. Металлографический метод контроля основного металла и сварных соединений химнефтеаппаратуры».

Надійшла до редколегії 23.12.2014.

**A.V. Faizullin, A.M. Fairushin, D.V. Karetnikov, M.Z. Zaripov, M.R. Fatkullin**

### **REPAIR OF 20CrMnSiVaL STEEL PUMPING UNITS WITH THE USE OF WELDING TECHNOLOGIES**

*Low-alloy cast steel are widely used 20CrMnSiVaL for tanks, machines and devices (pumps, compressors, hydraulic boxes and other) are used in the oil and gas industry. One of the main problem of improving the quality of machines is improving technology hull repair. The housings are made of cast steel using electric arc welding.*

*We used the finite element method in the program ANSYS. We did an analysis of stress-strain state in the model of the welded joint. This model simulates the machine body. We have considered and implemented the technology of repair by welding and different types of treatment. We conducted a comparative study of the mechanical properties.*

**Key words.** *Hull repair machines, welding steel foundries, evaluation of the stress-strain state, welding stresses, mechanical properties, weld, ultrasonic treatment*

**А.В. Файзуллин, А.М. Файрушин, Д.В. Каретников, М.З. Заріпов, М.Р. Фаткуллин**

### **РЕМОНТ КОРПУСІВ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ІЗ СТАЛІ 20ХГСФЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Для виготовлення корпусів машин і агрегатів (насосів, компресорів, гідравлічних коробок і т.д.), що використовуються в нафтогазовій галузі, широко застосовується низьколегована ливарна сталь ферито-перлітного класу марки 20ХГСФЛ. Одним з гострих завдань, що стосуються підвищення якості машин і агрегатів, є вдосконалення технології ремонту корпусів, виготовлених з ливарних сталей.*

*У даній роботі із застосуванням методу кінцевого елемента в програмному комплексі ANSYS був проведений аналіз напружено-деформованого стану в моделі зварного з'єднання, що імітує корпус машини, розглянута і реалізована технологія проведення ремонту з застосуванням ультразвукової обробки шва і супутнього охолодження, виконані дослідження механічних властивостей, мікро- і макроструктури.*

**Ключові слова.** *Ремонт корпусів машин, зварювання ливарних сталей, оцінка напружено-деформованого стану, зварювальні напруги, механічні властивості, зварене з'єднання, ультразвукова обробка.*