

УДК 621.791.16

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

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

Файзуллин А.В., Файрушин А.М., Каретников Д.В., Фаткуллин М.Р.,
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Faizullin, A.M. Fairushin, D.V. Karetnikov, M.R. Fatkullin,
FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation
e-mail: tna_ugntu@mail.ru

Аннотация. 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. Значительное количество такого оборудования работает под одновременным воздействием высоких давлений, коррозионного и эрозионного воздействия от рабочих сред, значительного перепада температур, механических нагрузок от движущихся частей.

При эксплуатации нефтегазопромыслового оборудования с течением времени часто происходит разрушение элементов корпуса вследствие воздействия температурных и силовых нагрузок, коррозии и других факторов. Большинство конструктивных элементов корпусов нефтегазопромыслового оборудования ремонтируются с применением сварочных операций. Высококонцентрированный источник тепловой энергии и различная деформационная способность деталей являются

причиной возникновения значительных остаточных напряжений, которые влияют на точность изготовления и работоспособность элементов.

Одной из острых задач, касающихся повышения качества машин и агрегатов, является совершенствование технологии ремонта корпусов, изготовленных из литейных сталей с применением электродуговой сварки.

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, рассмотрены и реализованы технологии проведения ремонта с применением сварки и различных видов обработки, выполнены сравнительные исследования механических свойств. Также в работе приводятся результаты расчета уровня остаточных сварочных напряжений в образцах, сваренных по различным технологиям.

Для сравнения рассмотрены как традиционные технологии термической обработки, так и деформационные способы – ультразвуковая и вибрационная обработка.

Abstract. 20CrMnSiVaL low-alloy cast steel is widely used for tanks, machines and devices (pumps, compressors, hydraulic boxes and other) in the oil and gas industry. A large amount of such equipment operates under conditions of high pressure, corrosive effect of the working environment, a large temperature difference, mechanical loading due to moving parts.

During its operation the elements of oil and gas are eroded due to temperature and power loads, corrosion, and other factors. Most constructive elements of gas and oil equipment are repaired by welding. A highly concentrated heat source and deformation capacity are the cause of residual stresses. They affect the performance and accuracy of manufacturing elements.

One of the main problems concerning the improvement of the quality of machines is the enhancement of housing repair technology. The housings are made of cast steel using electric arc welding.

In this work we employed the finite element method in the program ANSYS. We performed an analysis of stress-strain state in the model of the welded joint simulating the machine body. We considered and implemented the technology of repair by welding and different types of treatment. We conducted a comparative study of mechanical properties. In this paper we also present the results of residual welding estimation in samples welded using various technologies.

We compared traditional technologies of heat treatment and deformation processing – ultrasonic and vibration treatment.

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

Key words: machine surface repair, welding steel foundries, evaluation of the stress-strain state, welding stresses, mechanical properties, weld, ultrasonic treatment, vibration treatment.

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, на сегодняшний день, является практически единственным применяемым способом сварки, используемым при ремонте нефтегазопромыслового оборудования.

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.

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. 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).



Рисунок 1. Трещина в околошовной зоне сварного соединения корпуса насоса

Срок службы наплавленного металла посадочных мест клапанов, которые подвержены значительному эрозионному износу, составляет в среднем 300-400 часов. Как правило, насосное оборудование после ремонта с применением существующих сварочных технологий не отвечает своим техническим характеристикам.

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).

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.

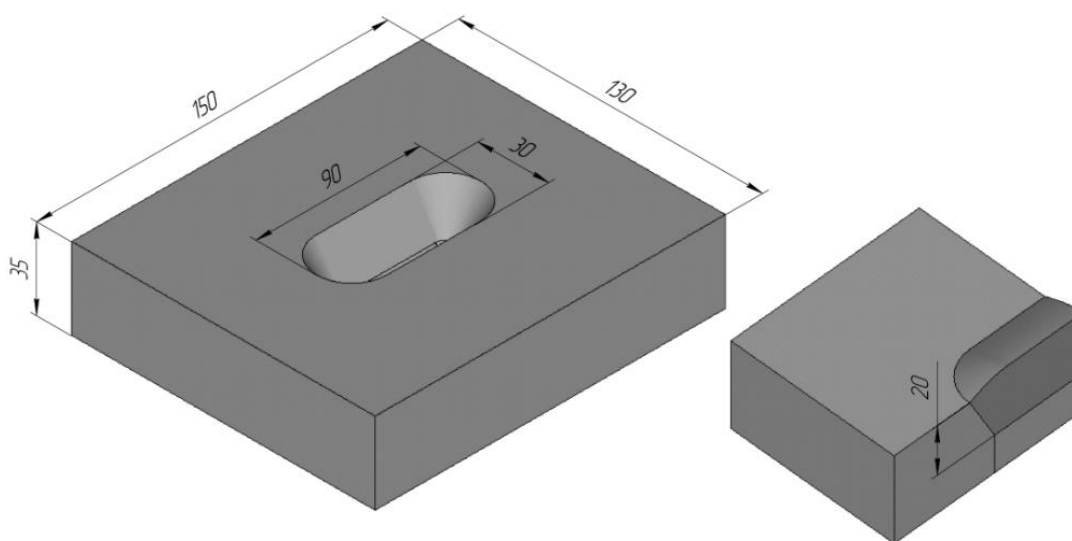


Рисунок 2. Размерная модель образца

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.

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).

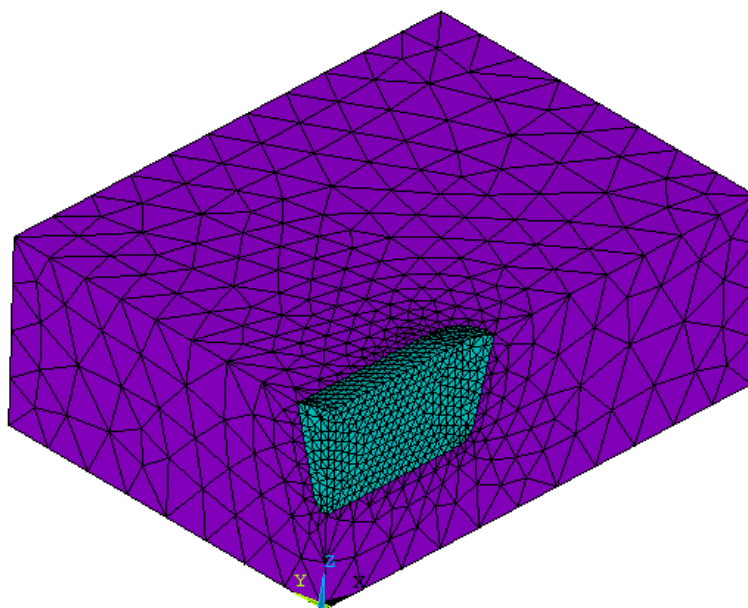


Рисунок 3. Конечно-элементная модель четверти заваренного образца

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 °С, температура окружающей среды – 20 °С.

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 °С.

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).

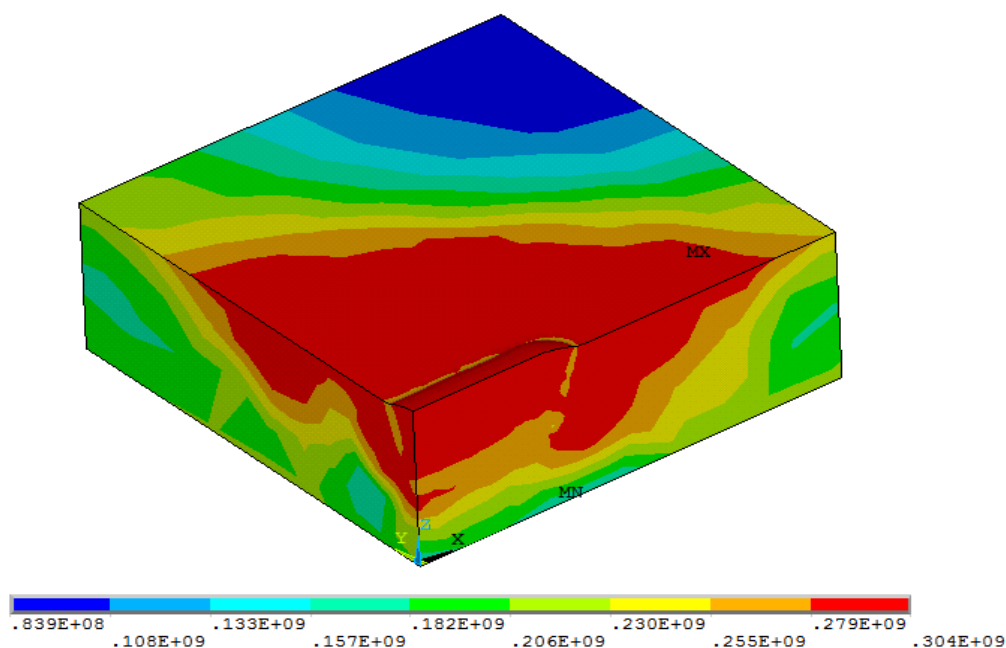


Рисунок 4. Распределение эквивалентных напряжений, МПа

На рисунке 5 представлены, полученные расчетным путем, графики действующих напряжений, возникающих в поперечном сечении шва на поверхности металла.

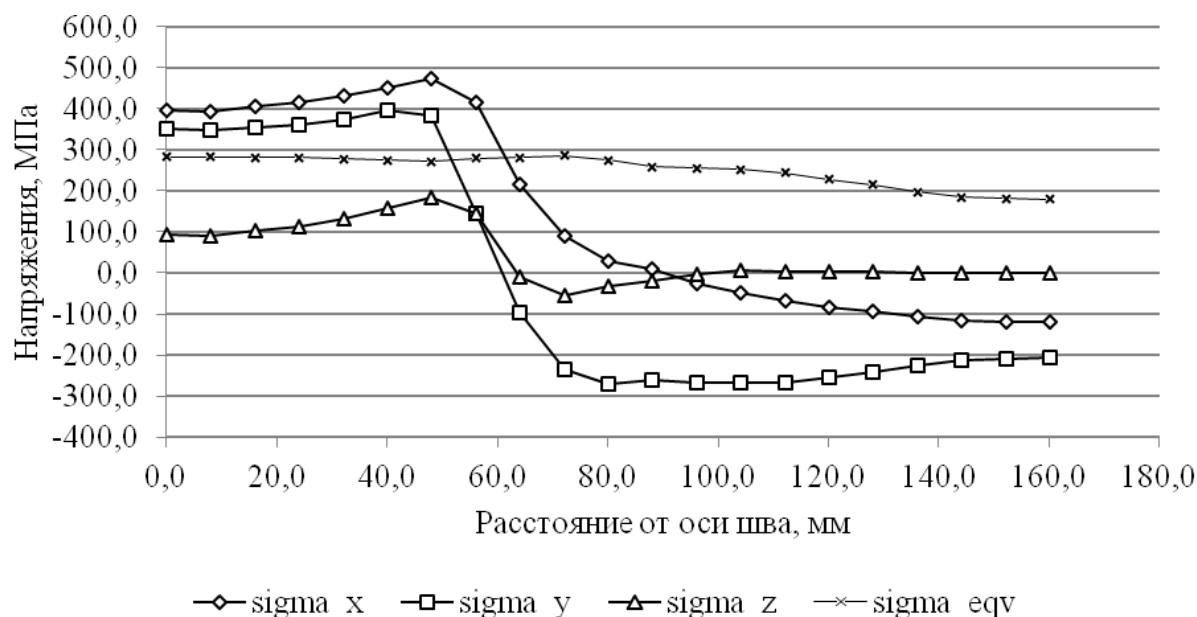


Рисунок 5. Напряжения в поперечном сечении на поверхности металла

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 данные напряжения оказывают негативное влияние на коррозионную стойкость сварных соединений.

Для решения данной проблемы в работе рассматриваются различные технологии обработки сварного шва в процессе сварки литых сталей на примере стали 20ХГСФЛ. Сварку проводили электродами УОНИ 13/55 с применением следующих методов обработки:

- 1) сварка без обработки;
- 2) с предварительным подогревом 250 °С (традиционная технология);
- 3) с ультразвуковой обработкой в процессе и после сварки 25...27 кГц;
- 4) с сопутствующим охлаждением;
- 5) с вибрационной обработкой 50 Гц.

Ручная дуговая сварка производилась электродами диаметром 3 мм, сила сварочного тока 70-90 А. Исследования проводили на пластинах, вырезанных из корпуса насоса, изготовленного из стали 20ХГСФЛ. Пластины имели следующие размеры: длина 110, ширина 65, толщина 4,4 мм.

Использование вышеназванных технологий принималось исходя из следующих аргументов:

- в результате предварительного подогрева снижается уровень сварочных напряжений, улучшаются структура и свойства металла соединения (на сегодняшний день данная технология является общепринятой) [1];

- используя охлаждение во время сварки, мы имеем возможность измельчить зерно, повысить прочностные свойства и ударную вязкость в зоне термического влияния, уменьшить зону термического влияния [2];

- сварка с сопутствующей вибрационной обработкой позволяет: снижать уровень остаточных напряжений в металле сварного шва и зоне термического влияния; снижать неоднородность структуры металла шва и околошовной зоны; улучшать механические свойства металла шва; повышать выносливость материала сварного соединения; повышать коррозионную стойкость металла сварного соединения [3-8];

- ультразвуковая обработка оказывает комплексное воздействие на сварное соединение, снижая концентрации напряжений нагрузки в сварном соединении, создавая на обрабатываемой поверхности упрочняющий слой с повышенной сопротивляемостью к образованию трещин и т.д. [9].

После сварки были проведены исследования влияния предварительного подогрева, сопутствующего охлаждения, вибрационной и ультразвуковой обработки на механические свойства металла сварного соединения в соответствии с ГОСТ 6996, а также был проведен рентгеноструктурный

анализ образцов с целью определения остаточных напряжений в сварном шве.

Испытание на растяжение проводилось на испытательной машине ИР 5113-100. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 6996, по 3 образца для каждого режима обработки. Определение механических характеристик проводилось в зоне сварного шва образцов. Для этого на образцах были выполнены шейки для того, чтобы металл разрушался именно по зоне сварного шва. Скорость деформирования составляла $V_d = 1$ мм/мин, температура испытаний -20 °С. Результаты испытаний на статическое растяжение приведены ниже, на диаграммах (рисунки 6 и 7).

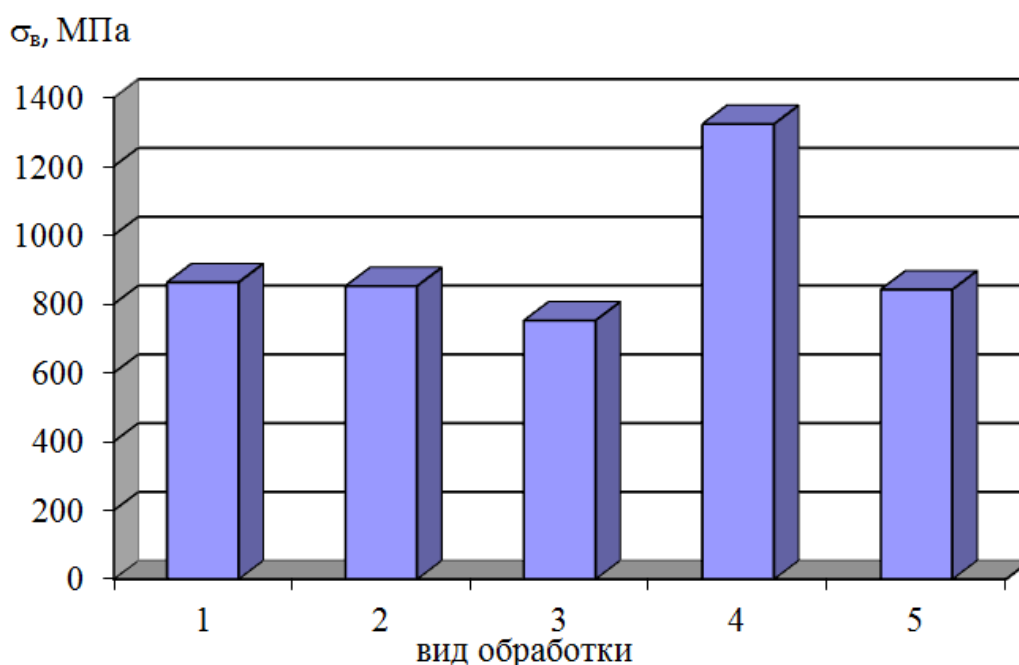


Рисунок 6. Диаграмма зависимости предела прочности (временное сопротивление) сварного шва σ_b , МПа от вида обработки в процессе сварки (1 - сварка без обработки; 2 - сварка с подогревом 250 °С; 3 - сварка с УЗО в процессе и после сварки по шву; 4 - сварка с сопутствующим охлаждением; 5 - сварка с виброобработкой)

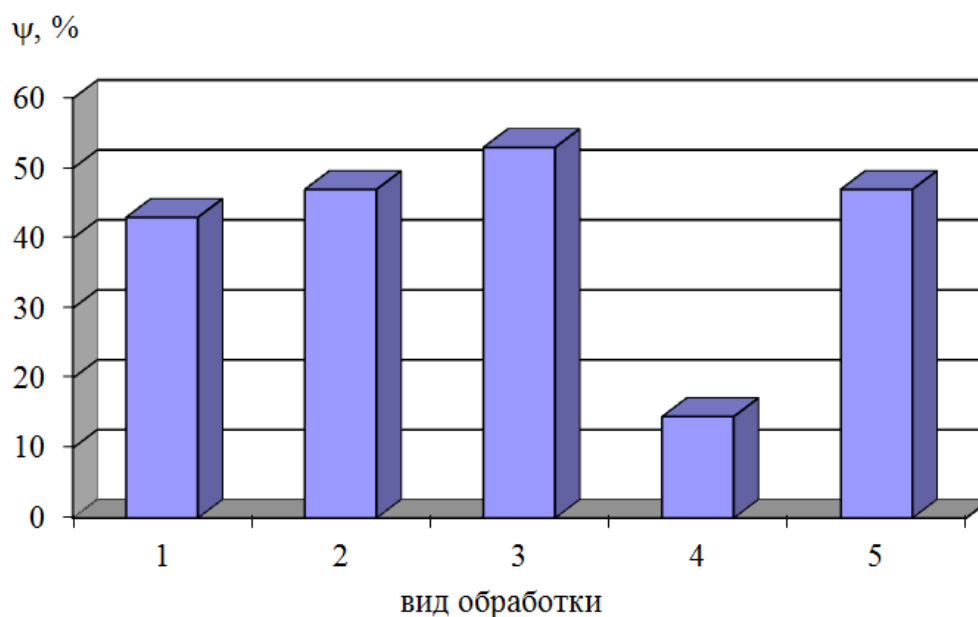


Рисунок 7. Диаграмма зависимости относительного сужения образца при статическом растяжении от вида обработки во время сварки (1 - сварка без обработки; 2 - сварка с подогревом 250 °С; 3 - сварка с УЗО в процессе и после сварки по шву; 4 - сварка с сопутствующим охлаждением; 5 - сварка с виброобработкой)

С учетом того, что предел прочности основного металла стали 20ХГСФЛ не превышает 600 МПа, наиболее предпочтительной оказалась ультразвуковая обработка образцов. Ультразвуковая обработка позволяет повысить запас пластичности металла сварного шва в среднем на 12%, по сравнению с существующей технологией с предварительным подогревом. При этом предел прочности сварного шва соответственно снижается, однако при этом прочность сварного шва выше прочности основного металла.

Измерение твердости (по методу Виккерса) проводили с использованием видеомикроскопа «Axiovert - 100 А» с твердомерной приставкой «МНТ – 10» и системой анализа изображения «KS – 300». Нагрузка на индентор составляла - 100 г, время выдержки под нагрузкой – 10 с, скорость поднятия пирамидки - 5 г/с. Для одного состояния проводилось, как минимум, по 6 измерений твердости. Обработка результатов проводилась с применением аппаратных методов, встроенных

в программу «Excel» с доверительной вероятностью 75%, при этом относительная ошибка измерения твердости не превышала 5%.

Для наглядности полученных результатов была построена диаграмма, которая приведена на рисунке 8.

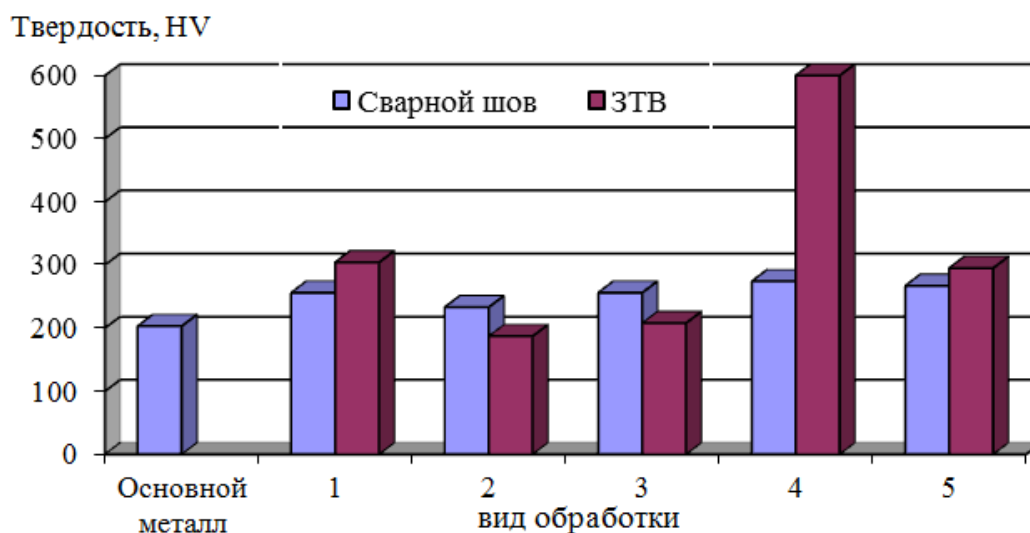


Рисунок 8. Диаграмма зависимости твердости основного металла, металла сварного шва и зоны термического влияния от вида обработки в процессе сварки (1 - сварка без обработки; 2 - сварка с подогревом 250 °С; 3 - сварка с УЗО в процессе и после сварки по шву; 4 - сварка с сопутствующим охлаждением; 5 - сварка с виброобработкой)

В процессе охлаждения в околошовной зоне сварного соединения образуется характерная мартенситная структура металла, пластичность стали снижается, образуется сложное напряженное состояние, обусловленное дополнительными сварочными напряжениями. Твердость шва и околошовной зоны увеличивается, что приводит к высокой вероятности образования холодных трещин.

Применение ультразвуковой обработки не позволяет снизить твердость, как в случае использования предварительного подогрева, и на первый взгляд ухудшает технологическую прочность шва. Однако мы видим в этом два положительных момента: чем тверже поверхность металла, тем выше её износостойкость к эрозионному разрушению; исключение операции подогрева позволят снизить объём зоны термического влияния, в

том числе и хрупкой прослойки, образовавшейся в результате перегрева металла.

Для определения уровня остаточных сварочных напряжений был проведен рентгеноструктурный анализ образцов, который выполнялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН 4-07 с выводом дифракционных данных на персональный компьютер. Использовали CoK излучение с фокусировкой по Бреггу – Brentано со щелями Соллера на первичном пучке и графитовым кристалл-монохроматором на дифрагированном пучке. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программного пакета «Maud». Алгоритм программы использует метод Ритфелда (порошковый полнопрофильный метод).

Результаты анализа представлены на рисунке 9.

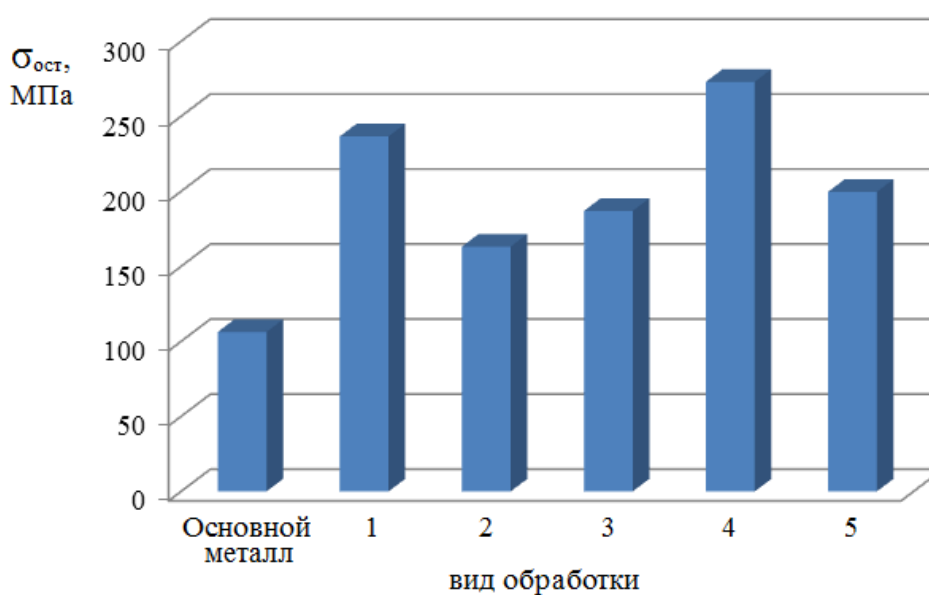


Рисунок 9. Результаты расчета остаточных напряжений (1 - сварка без обработки; 2 - сварка с подогревом 250 °С; 3 - сварка с УЗО в процессе и после сварки по шву; 4 - сварка с сопутствующим охлаждением; 5 - сварка с виброобработкой)

Из диаграммы (рисунок 9) видно, что минимальный уровень остаточных напряжений в образце, выполненном с применением предварительного подогрева, составляет 163,2 МПа, незначительно выше наблюдаются остаточные напряжения в образце с сопутствующей ультразвуковой обработкой – 186 МПа. В образцах, выполненных с

применением вибрационной обработки, величина напряжений составляет 199,6 МПа. При остальных способах обработки величина внутренних напряжений превышает 200 МПа, что говорит о значительном уровне внутренних напряжений и высокой вероятности образования холодных трещин.

Выводы

1 Результаты проведенных исследований показывают возможность совершенствования технологического процесса ремонта корпусов насосов, выполненных из стали 20ХГСФЛ, путем замены энергозатратного предварительного подогрева ремонтируемого участка перед сваркой на ультразвуковую обработку данного участка в процессе сварки.

2 Для повышения технологической прочности данного сварного узла рекомендуется ограничивать тепловую мощность с целью уменьшения участка перегрева зоны термического влияния, а также использовать ударную ультразвуковую обработку сварных швов.

Список используемых источников

1 Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.

2 Технологическая инструкция по ручной электродуговой сварке изделий из малоуглеродистых закаливаемых сталей типа 15Х5М с сопутствующим охлаждением без термической обработки / Бакиев А.В. [и др.]. Уфа: ВНИИ ПТхимнефтеаппаратуры, 1982. С. 26.

3 Сутырин Г.В. Снижение остаточных напряжений сварных соединений низкочастотной вибрационной обработкой // Сварочное производство. 1983. № 2. С. 22 – 24.

4 О влиянии параметров вибрационной обработки на свойства металла сварного соединения. / Файрушин А.М. [и др.] // Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9. № 2. С. 70 – 75.

5 Способ снижения остаточных напряжений в сварных соединениях металлов / Файрушин А.М. [и др.]: пат. 2424885, Рос. Федерация. № 2009149108/02, заявл. 28.12.09; опубл. 27.07.2011. 5 с.

6 Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений / Ризванов Р.Г. [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 3 (67). С. 337-342.

7 К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений / Хафизова О.Ф. [и др.] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2011. №1. С. 210-219. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf.

8 Влияние направления приложения вибрационного воздействия в процессе сварки на поле остаточных напряжений в стыковом сварном соединении / Колесников Я.А. [и др.] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2006. №4. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kolesnikov/Kolesnikov_1.pdf. 15 с.

9 Эльдарханов А. С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. М.: СПИИнтербук, 1996. 256 с.

References

1 Livshits L.S., Khakimov A.N. Metallovedenie svarki i termicheskaya obrabotka svarnykh soedineniy. 2 -e izdanie., pererabotal i dopolnil M.: Mashinostroenie, 1989. 336 s.[in Russian].

2 Tekhnologicheskaya instruktsiya po ruchnoy elektricheskoy svarke izdeliy iz malouglerodistykh zakalivayushchikhsya staley tipa 15H5M s soputstvuyushchim okhlazhdeniem bez termicheskoy obrabotki / A.V. Bakiev, [i dr.] Ufa: VNIPTkhimnefteapparatury, 1982. S. 26. [in Russian].

3 Sutyryn G.V. Snizhenie ostatochnykh napryazheniy svarnykh soedineniy nizkochastotnoy vibratsionnoy obrabotkoy // Svarochnoe proizvodstvo. 1983. №2. S. 22-24. [in Russian].

4 O vliyaniy parametrov vibratsionnoy obrabotki na svoystva metalla svarnogo soedineniya. / Fayrushin A.M. i dr. // Neftegazovoe delo. 2011. T. 9, №2, S. 70 - 75. [in Russian].

5 Sposob snigeniya ostatochnykh napryazheniy v svarnykh soedineniyah metallov / A.M. Fayrushin [i dr.]: pat. 2424885, Russia. №2009149108/02, zayavl. 28.12.09; opubl. 27.07.2011. 5 s. [in Russian].

6 Vliyanie parametrov vibratsionnoy obrabotki v protsesse svarki na svoystva svarnykh soedineniy / R.G. Rizvanov[i dr.] // Litie i metallurgiya. 2012. № 3 (67). S. 337-342. [in Russian].

7 K vliyaniyu vibracionnoi obrabotki na mehanicheskie svoystva raznorodnykh svarnykh soedineniy / Hafizova O.F. [i dr.] // Neftegazovoe delo: electron. nauch. gurn. 2011. №1. C. 210-219. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf. [in Russian].

8 Vliyanie napravleniya prilozheniya vibracionnogo vozdeistviya v processe svarki na pole ostatochnykh napryazheniyvstykovom svarnom soedinenii / Kolesnikov Ya.A. [i dr.] // Neftegazovoe delo: electron. nauch. gurn. 2006. № 4. URL:http://www.ogbus.ru/authors/Kolesnikov/Kolesnikov_1.pdf. 15 s. [in Russian].

9 Eldarhanov A. S. Protsessyi kristallizatsii v pole uprugih voln M.: SP Interbuk, 1996 256 s. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Файзуллин А.В., аспирант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Faizullin, Postgraduate Student, of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Файрушин А.М., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: tna_ugntu@mail.ru

Каретников Д.В., канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

D.V. Karetnikov, Candidate of Engineering Sciences, Lecturer of the Chair “Petroleum Apparatus Building Technology”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Фаткуллин М.Р., студент гр. МС-10-01 ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

M.R. Fatkullin, Student a Group of МС-10-01, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation