

Бахматов П. В., Старцев Е. А.
P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФЛЮСА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ОБРАЗЦАХ, ВЫЯВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛОВ

INFLUENCE OF ARC WELDING MODES UNDER A LAYER OF EXPERIMENTAL FLUX ON THE DISTRIBUTION OF INTERNAL STRESSES IN WELDED SAMPLES REVEALED BY MAGNETIC METAL MEMORY METHOD

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Старцев Егор Андреевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Аннотация. Рассмотрено влияние режимов автоматической дуговой сварки под слоем экспериментального флюса, полученного при переработке техногенных отходов металлургического производства (шлака электросталеплавильных печей), на деформацию и распределение остаточных напряжений в плоских тонкостенных сварных образцах низкоуглеродистой стали в условиях принудительного однопроходного формирования корня шва на керамических подкладках. Измерение градиента концентрации внутренних напряжений проведено методом магнитной памяти металла, визуализирующим их распределение по поверхности сварного образца.

Summary. The influence of modes of automatic arc welding under a layer of experimental flux obtained by processing of technogenic wastes of metallurgical production (slag of electric steel melting furnaces) on deformation and distribution of residual stresses in flat thin-walled welded samples of low-carbon steel under conditions of forced single-pass formation of weld root on ceramic pads is considered. Measurement of the gradient of internal stress concentration was carried out by the method of magnetic metal memory, visualizing their distribution on the surface of the welded specimen.

Ключевые слова: сварка под слоем флюса, остаточные внутренние напряжения, зоны концентрации напряжений, деформации.

Key words: welding under a flux layer, residual internal stresses, stress concentration zones, deformations.

Работа выполнена за счёт средств ФГБОУ ВО «КНАГУ» по проекту НИР № ВН001/2020 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки» (2020-2023 гг.).

УДК 621.791.753.5

Введение. Процедура дуговой сварки плавлением связана с расплавлением кромок основного и присадочного материала в процессе создания сварочной ванны, кристаллизацией ограниченного объёма металла сварочной ванны по мере продвижения дуги по стыку при формировании шва, прохождением фазовых превращений с изменением объёма металла, совместным охлаждением.

ем общего объёма металла сварного шва. При этом зона термического влияния (ЗТВ) также подвергается нагреву до температур фазовых превращений и изменению структуры металла [1]. Интенсивность охлаждения металла шва и зоны термического влияния приводит к появлению закалочных структур, увеличению пластической деформации свариваемых заготовок, как продольных, так и поперечных, образованию значительных остаточных напряжений. В процессе сварки под слоем флюса за счёт его низкой теплопроводности и высокой теплоёмкости удаётся снизить скорость охлаждения металла шва и ЗТВ, провести релаксацию напряжений и снизить уровень деформации свариваемых конструкций [2; 3]. Также этому способствует использование оптимальных параметров режима сварки, комплексно обеспечивающих как стабильность геометрических параметров сварного шва, так и механические свойства сварного соединения, обусловленные однородностью структуры претерпевающего изменения металла [4–6]. Имеются сведения и о технологиях, способствующих полному исключению деформаций при сварке под флюсом [7], требующих специальные мероприятия и дополнительное оборудование.

Тем не менее для общей оценки напряжённого состояния сварных конструкций необходим способ оперативного и наглядного определения уровня внутренних остаточных напряжений. Из всех известных методов [8; 10] таким требованиям наиболее отвечает метод магнитной памяти металла (МПМ) [11].

Метод МПМ – это метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений.

Собственное магнитное поле рассеяния изделия – это магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры металла на новых изделиях.

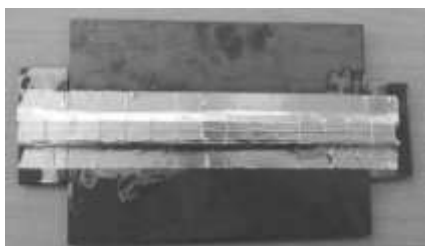
Для отдельных деталей и изделий, а также для сварных соединений метод МПМ основан на регистрации собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в зонах концентрации остаточных напряжений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли. В процессе изготовления любых ферромагнитных изделий (плавка, ковка, термическая и механическая обработка) механизм формирования реальной магнитной текстуры происходит одновременно с кристаллизацией при охлаждении, как правило, в магнитном поле Земли. В местах наибольшей концентрации дефектов кристаллической решётки (например, скоплений дислокаций) и неоднородностей структуры образуются доменные границы с выходом на поверхность изделия в виде линий смены знака нормальной составляющей СМПР. Эти линии соответствуют сечению детали с максимальным магнитным сопротивлением и характеризуют зону максимальной неоднородности структуры металла и, соответственно, зону максимальной концентрации внутренних напряжений (ЗКН) [12; 13].

Материалы и методы. Исследования проводили на восьми плоских сварных образцах из углеродистой конструкционной стали ВСт3сп размером 195×440×5 мм (см. рис. 1, а), имеющих тип сварного соединения С4 по ГОСТ 8713-79 – стыковое одностороннее однопроходное соединение без разделки кромок на плоских керамических подкладках, приклеиваемых к обратной стороне стыка через металлизированный скотч (см. рис. 1, б). Заготовки собирались без зазора; чтобы не допустить смещения кромок, приваривались технологические планки (100×40×5 мм, ВСт3сп) с проставлением двух коротких прихваток (10...15 мм).

Сварка образцов выполнялась проволокой Св-08А по ГОСТ 2246-70, диаметром 3 мм. В качестве защиты при автоматической сварке использовался разработанный сварочный флюс [14] грануляцией 1,0...4,0 мм.

Сварка производилась на автомате АДФ-1250 с источником питания ВДУ-1250 на режимах, указанных в табл. 1. Образец 8 для проведения сравнительного анализа выполнен с применением стандартного сварочного флюса АН-42.

а)



б)

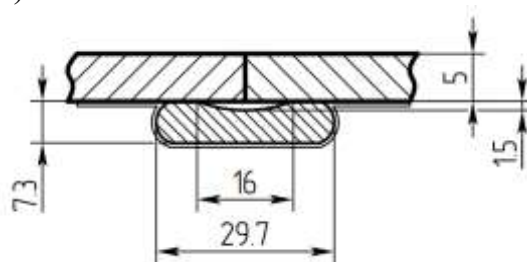


Рис. 1. Собранный под сварку образец с приклеенной керамической подкладкой:
а – общий вид собранного образца; б – профиль образца и керамической подкладки

Таблица 1

Режимы автоматической сварки под слоем флюса

Образец	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, см/мин
1	600	37	54
2	600	37	
3	500	37	
4	400	37	
5	450	37	
6	450	27	
7	500	27	
8	500	27	

Следует отметить, что при сварке образца 1 выявлено интенсивное порообразование, вызванное газообразованием по реакции раскисления при плавлении флюса и повышением давления в пространстве между поверхностями керамической подкладки и образца. Для предотвращения негативного влияния этого фактора в остальных образцах в фольгированном скотче сделаны отверстия длиной 10 мм и шагом 15 мм вдоль линии перехода от керамической подкладки к поверхности детали. Поэтому в табл. 1 образцы 1 и 2 имеют одинаковые режимы.

Задачей проведения исследований являлось установление характера воздействия полученного флюса на изменение напряжённо-деформированного состояния в объёме сваренных образцов с применением стандартных и экспериментальных флюсов.

Проведение измерений концентрации напряжений методом магнитной памяти по ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Контроль сварных соединений» осуществляли с помощью прибора ИКН-3М-12 (см. рис. 2, а) и сканирующего устройства № 2 2М-190, имеющего четыре феррозондовых преобразователя в двухкомпонентном их расположении – датчики ХУ (см. рис. 2, б) для измерения одновременно нормальной и тангенциальной составляющих магнитного поля. Расстояние между центрами датчиков 8 мм. Преимуществом устройства является соосное размещение датчиков с колесиком счётчика длины, позволяющее производить сканирование по криволинейным поверхностям с сохранением стабильности расстояния между датчиками и сканируемой поверхностью.

Обработку результатов сканирования производили в программе ММП-система 3.0, поставляемой совместно с ИКН-3М-12 (см. рис. 2, в), позволяющей преобразовывать результаты сканирования по отдельным линиям в единый график.

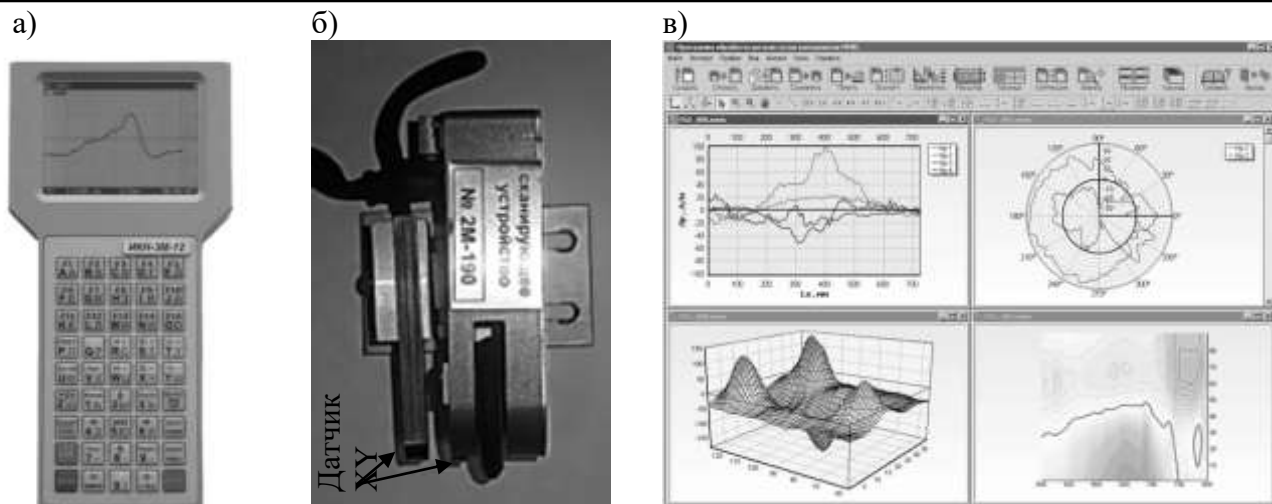


Рис. 2. Приборы и программное обеспечение для проведения, обработки и анализа результатов диагностического контроля по методу магнитной памяти металла:
 а – измеритель концентрации напряжений ИКН-3М-12; б – сканирующее устройство № 2М-190; в – интерфейс программы ММП-система 3.0

Схема сканирования сварных образцов методом МПМ приведена на рис. 3. Сканирование производили в поперечном направлении от линии шва в сторону направления сварки, при этом сварной шов располагался посередине каждой линии сканирования. Расстояние между линиями сканирования 16 мм. Шаг сканирования по оси составлял 1 мм. Отстройка от внешнего поля отключена. Количество сканирующих проходов зависело от качества сформированных валиков и составляло в среднем от 13 до 18. Для равномерного сканирования на лицевой стороне сварных образцов маркером согласно схеме (см. рис. 3) нанесены линии, которые обкатывались колесиком счётчика сканирующего устройства. Начало сканирования (место позиционирования колесика сканирующего устройства в положении «0») смещено от торца пластины на 10 мм для исключения влияния торцевых дефектов, образуемых при рубке заготовок на гильотинных ножницах. Учитывая вышесказанное, середина шва располагается в каждом образце на расстоянии 90 мм от точки «0». В среднем ширина ЗТВ слева и справа от сварного шва имеет протяжённость 20 мм. Общая длина каждой линии сканирования с учётом выпуклости шва составляет 195 мм.

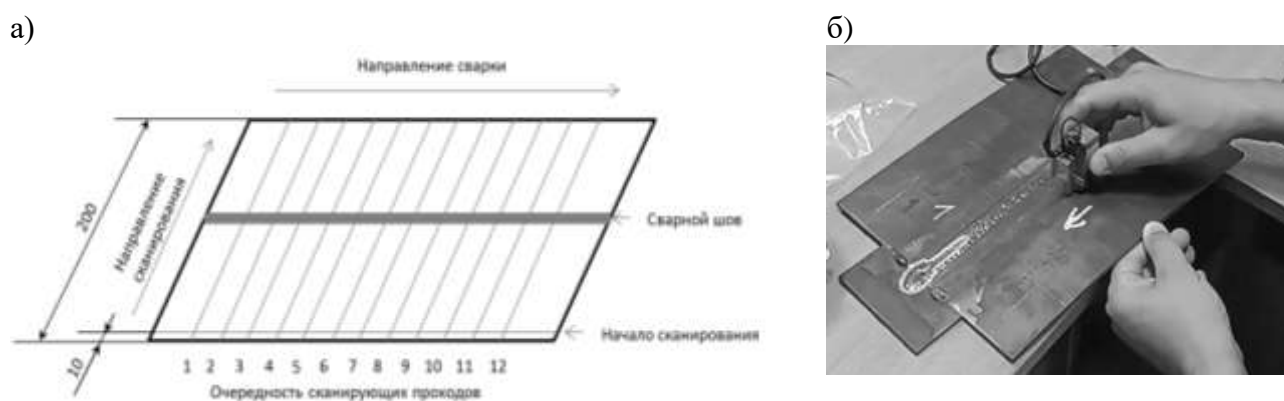


Рис. 3. Схема (а) и процесс (б) проведения сканирования сварных образцов по методу МПМ

Результаты сканирования преобразовывались в график-линию (H_p - и dH_p/dx -графики) и G-график – график абсолютной величины градиента функции $H_p(x,z)$:

$$G = |\text{grad}H_p| = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)^2}.$$

При построении H_p - и dH_p/dx -графиков в каждом сканирующем проходе прибором ИКН-3М-12 строилось 4 кривых (2 тангенциальных (чётные номера) и 2 нормальных (нечётные номера), составляющих СМПР – H_p). Каждая кривая названа на графике «Каналом». На общем графике по каждому образцу все кривые объединяются, таким образом, количество каналов на графике соответствует четырёмкратному количеству сканирующих проходов.

В трёхмерном G-графике по оси X откладывается расстояние от начала отчета (Lx) в миллиметрах; по оси Z откладываются номера каналов, начиная с 0, по оси Y откладываются значения абсолютных величин вектора градиента функции $H_p(x,z)$.

Оценку локальных остаточных напряжений на поверхности материала сварных образцов проводили рентгеновской дифрактометрией на установке RIGAKU MSF-3М. Для измерений остаточного напряжения использовалась Cr-рентгеновская трубка, обеспечивающая ограниченное затухание $K\alpha$ -лучей и имеющая атомное число ниже на единицу.

Режим работы дифрактометра: напряжение и ток на трубке 30 kV / 10 mA, диапазон сканирования: 149, 100...163, 500°, угол наклона: 156,400°, метод измерения: Изо-наклон, ширина выборки: 0,200°. Время отсчёта: 6,00 с, метод фиксированного psi. Колебание: Нет.

Метод [сглаживания]: метод сглаживания Савицкого – Голея. Точек сглаживания: 7.

Коэффициент линейного поглощения: 850,4000 (1/см).

Метод поиска пиков: FWHM.

Наклон: 0,3598 град. Постоянное напряжение: –318,00 МПа/град. 2Т (psi=0): 156,378 град. Модуль Юнга: 223 300,00 МПа, Коэффициент Пуассона: 0,280.

Областями измерения напряжений в каждом сварном образце являлись металл шва и ЗТВ. Учитывая факт изготовления заготовок образцов из одного листа, сравнение остаточных напряжений производили в отношении основного металла, где также измерено остаточное напряжение, принятое как исходное.

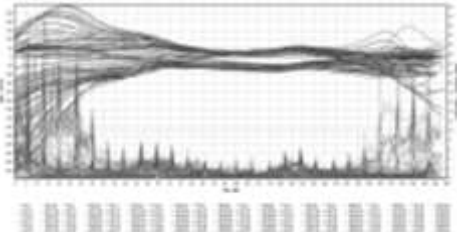
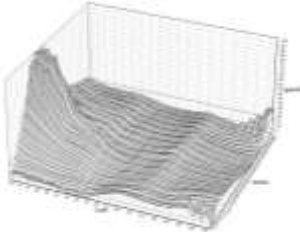
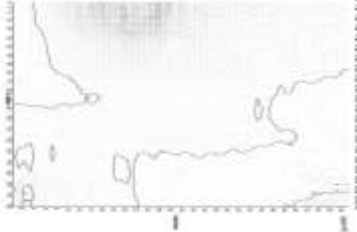
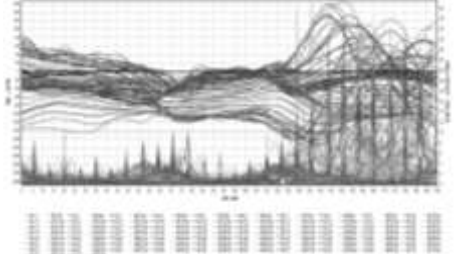
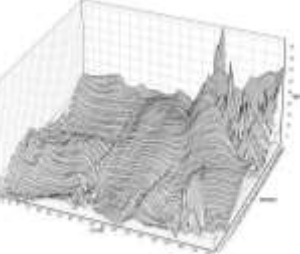

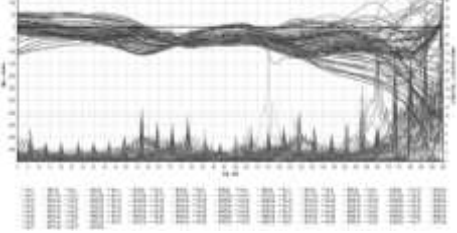
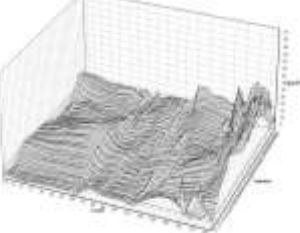
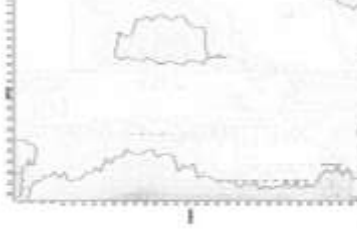
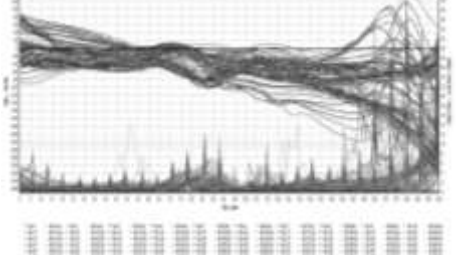
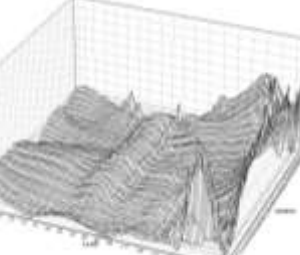
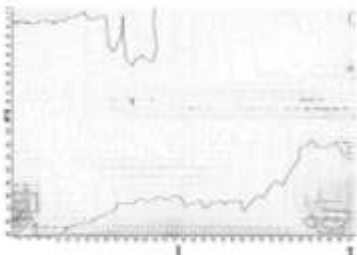
При анализе величины остаточных напряжений приняли следующее определение: продольные и поперечные напряжения определяются по направлению сварного шва, соответственно, вдоль и поперек шва.

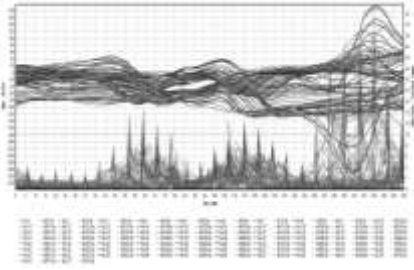
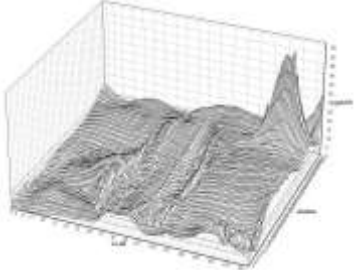
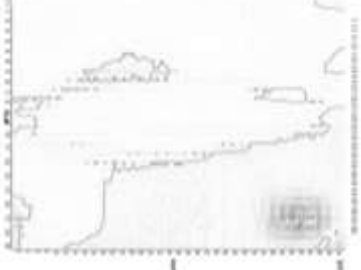
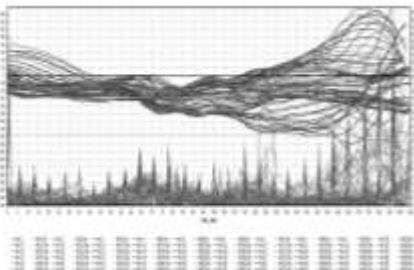
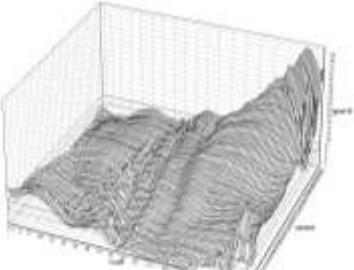

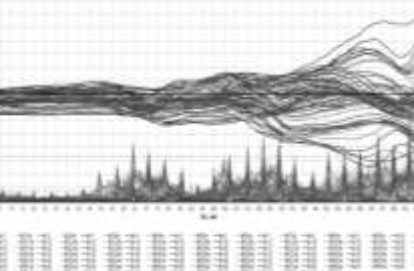
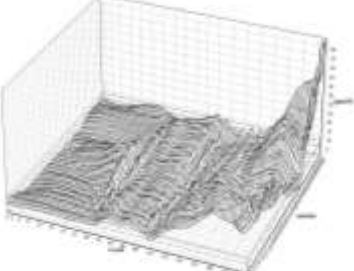
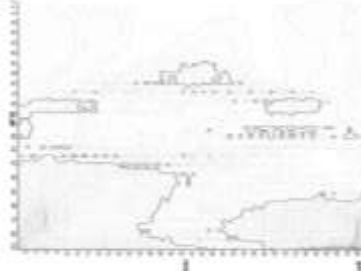
Результаты и их обсуждение. Результаты сканирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты диагностики по ММП

Образец	График-линия (H_p - и dH_p/dx -графики)	График-поверхность $ \text{grad} H_p $	Топограммы распределения градиента напряжений по исследуемым образцам
1	2	3	4
1			
<p>Максимальное значение Градиента H_p на участке: $K(x,z)_{\max} = 40,720$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_p: $X = 0,0; Z = 380, .$ Среднее значение Градиента H_p на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 12,011$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 3,390$.</p>			

1	2	3	4
2			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 149,040$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 0,0; Z = 164,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 16,442$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 9,064$.</p>			
3			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 50,877$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 144,0; Z = 484,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 8,082$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 6,295$.</p>			
4			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 101,689$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 192,0; Z = 204,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 7,085$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 14,353$.</p>			
5			
<p>Максимальное значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\max} = 70,907$. Координаты точки с максимальным значением Градиента Нр: $X = 176,0; Z = 3,0$. Среднее значение Градиента Нр на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 7,297$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 9,718$.</p>			

1	2	3	4
6			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке: $K(x,z)_{\max} = 87,146$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r: $X = 174,0; Z = 484,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке: $K(x,z)_{\text{cp}} = 8,526$. Коэффициент предельного состояния металла: $m = 10,221$.</p>			
7			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\max} = 56,486$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r : $X = 175,0; Z = 548,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\text{cp}} = 7,581$. Коэффициент предельного состояния металла : $m = 7,451$.</p>			
8			
<p>Максимальное значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\max} = 88,162$. Координаты точки с максимальным значением Градиента H_r : $X = 195,0; Z = 3,0$. Среднее значение Градиента H_r на участке : $K(x,z)_{\text{cp}} = 7,87801$. Коэффициент предельного состояния металла : $m = 11,190$.</p>			

Как видно из графиков-поверхность $|\text{grad } H_r|$ (см. табл. 2), все экспериментальные образцы имеют превышение градиента напряжений по одной из продольных граней пластин. Причиной такого явления может служить перераспределение напряжений при их релаксации с компенсацией пластической деформацией.

Образец 1 имеет наибольшее расхождение по значениям напряжённости магнитного поля нормальной и тангенциальной составляющим, при этом градиент поля не превышает критического уровня $K = 10$ (левый график). Характерным для этого образца распределением градиента напряжений (правый график) является его повышенное значение ($15 \dots 20$ (А/м)/мм) по всей длине шва и околошовной зоны, наличие примыкающей к ней зоны с минимальным градиентом напряжений (2 (А/м)/мм), переходящей к максимальному уровню напряжений ($15 \dots 30$ (А/м)/мм) по кромке исследуемого образца.

Образец 2 по всей длине шва и ЗТВ обладает равным значением градиента напряжений, причём в шве он составляет 2...3 (А/м)/мм на ширину 60 мм. Линии напряжённости магнитного поля H_p не превышают 40 А/м (соответствуют напряжённости магнитного поля Земли).

В целом, для образца 2 характерно равномерное распределение напряжений по всему объёму образца (2...5 (А/м)/мм), но по правому краю пластины в начале сканирования выявлен локальный участок с повышенным градиентом напряжений до 100 (А/м)/мм.

Образец 3 также имеет низкие значения градиента напряжений равномерно вдоль линии шва и прилегающей к нему ЗТВ (1...5 (А/м)/мм) с повышением значения от начала к концу шва. Слева от шва наблюдается волнообразное колебание уровня градиента напряжений с впадиной в центре длины шва и выпуклостями в начале и в конце шва. Слева от шва в конце пластины зафиксирован максимум градиента напряжений вблизи кромки (47 (А/м)/мм).

Подобная картина распределения градиента напряжений наблюдается и в образце 4, за исключением максимума градиента по всей длине левой кромки, составляющего 35...70 (А/м)/мм.

В образце 5 по длине шва имеется повышенный уровень градиента напряжений (8...12 (А/м)/мм), наблюдается снижение его уровня в ЗТВ до 2...3 (А/м)/мм и волнообразное распределение по правой кромке пластины (2...8 (А/м)/мм), а слева – повышение градиента до 30...40 (А/м)/мм.

Образец 6 по линии шва имеет равномерный уровень градиента напряжений, имеющий среднее значение 2...4 (А/м)/мм с резким возрастанием этого параметра по ЗТВ (по 40 мм в сторону от шва) с превышением критического уровня (8...15 (А/м)/мм). Справа от шва по основному металлу градиент напряжений не высок (0...3 (А/м)/мм), а слева по основному металлу от начала сканирования имеется участок равномерного распределения (2...4 (А/м)/мм), заканчивающийся локальным участком с максимумом уровня (55 (А/м)/мм).

Для образца 7 характерно равномерное распределение градиента напряжений по всей правой стороне образца и началу левой, со средним значением 2...3 (А/м)/мм. От середины левой стороны образца и шва до его конца наблюдается рост градиента напряжений до 40 (А/м)/мм.

Образец 8 имеет повышенное значение градиента напряжений по всей длине шва (2...3 (А/м)/мм). Правая пластина имеет среднее значение dH_p/dx 0...1 (А/м)/мм с локальным участком протяжённостью 100 мм от ЗТВ в основной металл с повышением до 12...15 (А/м)/мм. Левая пластина по кромке – до 70 (А/м)/мм. Характерно для образца 8 наличие узкой зоны (5...8 мм) вдоль шва (слева и справа от него) с повышенным градиентом напряжений 10...12 (А/м)/мм. Слева такое явление наблюдается ещё трижды с интервалом 10 мм.

На графиках распределения поля H_p и интенсивности его изменения dH/dx чётко просматриваются ЗКН, проявившиеся в сварных швах экспериментальных пластин.

Таким образом, наиболее равномерный уровень градиента напряжений выявлен в образце 2.

В программе ММП-система 3.0 существует возможность построения топограмм распределения градиента напряжений (см. табл. 2), где синим цветом отмечается плоскость критического значения $K = 15$, а красным – области максимума градиента напряжений.

В программе ММП-система 3.0 возможно проведение анализа получаемых прибором ИКН графиков как в целом по каждому образцу, так и по группе образцов, причём в некоторых выбранных участках. В нашем случае этими участками являются: сварной шов (диапазон расстояния от начала сканирования 90...100 мм) и ЗТВ справа (диапазон расстояния от начала сканирования 70...90 мм) и слева (диапазон расстояния от начала сканирования 100...120 мм) от сварного шва (см. рис. 4).

На рис. 4 приведён результат анализа всех 8 экспериментальных образцов по всей длине (0... 195 мм). Установлено, что для всей группы образцов K_{cp} составляет 9,122, а наибольшее значение $K(x,z)_{max}$ имеет образец 2 (-100,887), а следовательно, и параметр m , характеризующий предельную деформационную способность материала. При этом именно в этом образце наблюдается наименьшее расхождение значений $m(x,z)$ и $m(x)$, что подтверждает стабильность свойств металла образца.

Для зонального анализа характерно небольшое изменение $K(x,z)_{cp}$ сварного шва (7,103) (см. рис. 5) и ЗТВ справа (7,116) и слева (6,760) от сварного шва (см. рис. 6 и 7), подтверждающее равномерность градиента напряжений в этих зонах.

а)

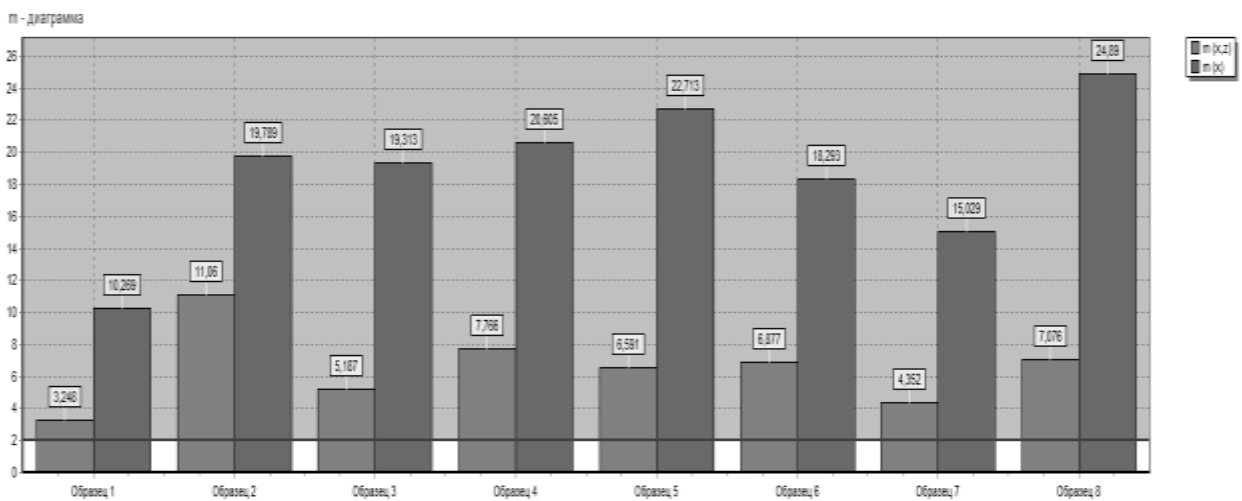
Анализ группы файлов по "К" и "m" критериям.

Критерии отбора: К (x,z) > 0,000 К (x) > 0,000 К (z) > ---	Критерии отбраковки: m (x,z) > 0,000 m (x) > 0,000 m (z) > ---	Участок длины графиков Начало : 0 Конец : 195	Средние величины: К (x,z) ср = 9,122 К (x) ср = 1,838 К (z) ср = ---
----------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Имя файла	К(x,z)max	m (x,z)	К (x) max	m (x)	К (z) max	m (z)	H min	H max
Образец 1	29,629	3,248	18,875	10,269	---	---	-196,1	151,3
Образец 2	100,887	11,060	36,375	19,789	---	---	-688,0	293,5
Образец 3	47,316	5,167	35,500	19,313	---	---	-259,1	166,9
Образец 4	70,839	7,766	37,875	20,605	---	---	-545,3	146,1
Образец 5	60,124	6,591	41,750	22,713	---	---	-334,6	143,5
Образец 6	62,736	6,877	33,625	18,293	---	---	-336,0	195,1
Образец 7	39,695	4,352	27,625	15,029	---	---	-220,6	297,0
Образец 8	64,546	7,076	45,750	24,890	---	---	-294,5	336,4

Всего отобрано файлов : 8 из 8

б)



в)

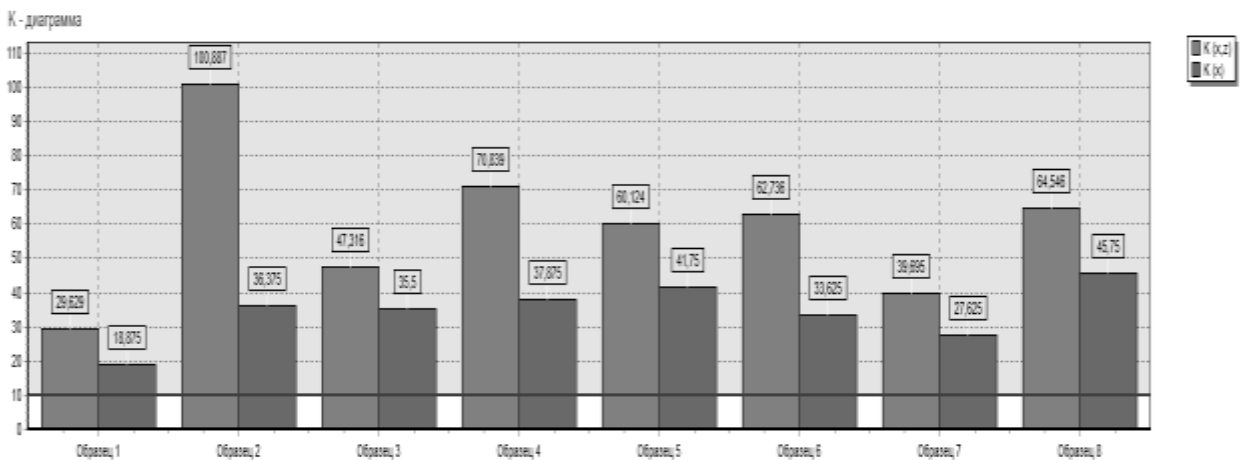
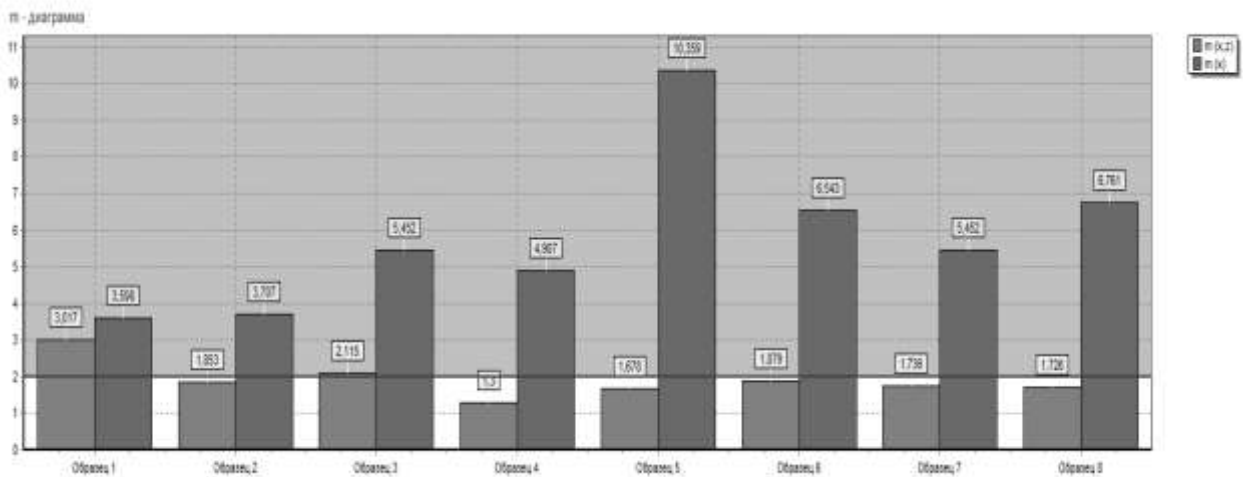


Рис. 4. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по 8 экспериментальным образцам

а)



б)



в)

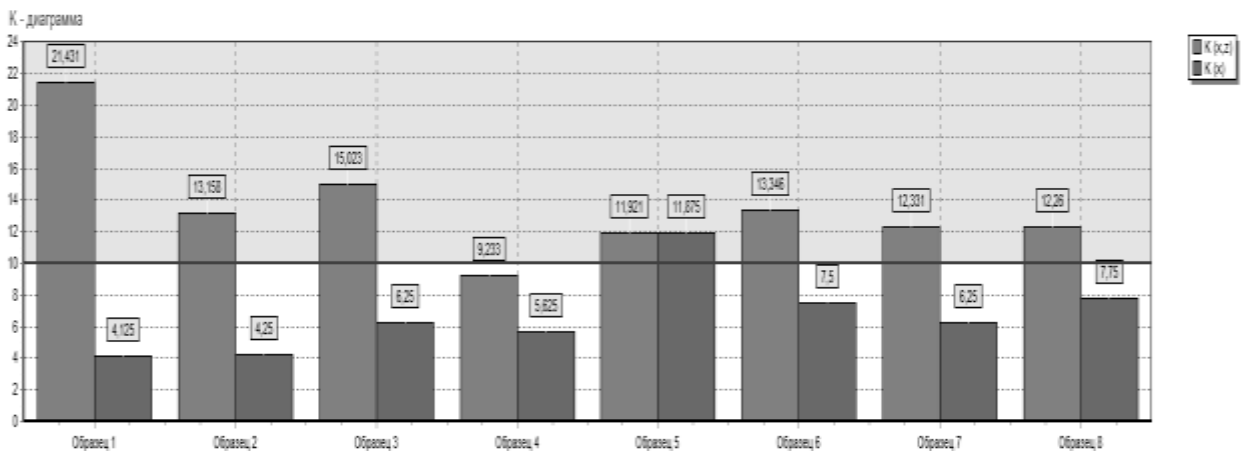


Рис. 5. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) в сварных швах экспериментальных образцов

а)

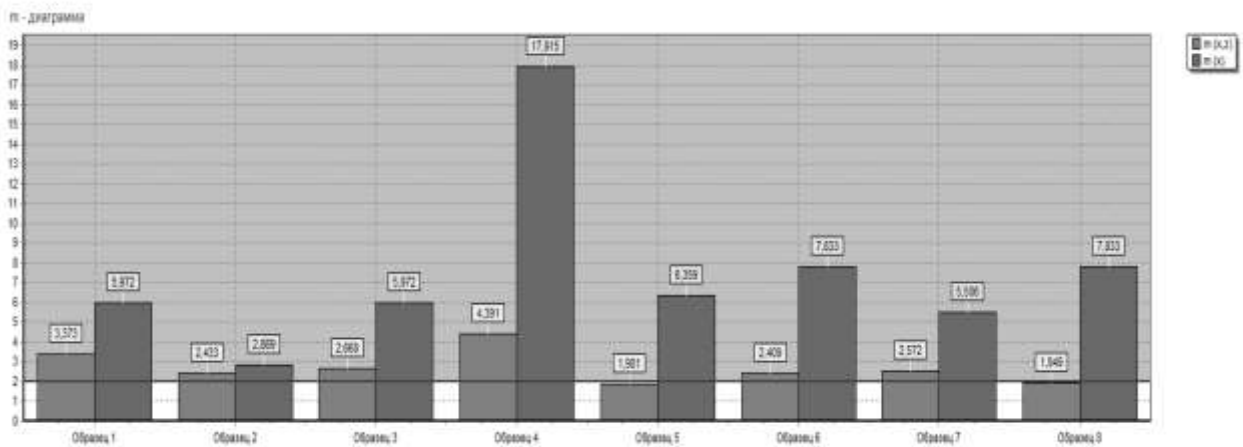
Анализ группы файлов по "К" и "m" критериям.

Критерии отбора:	Критерии отбраковки:	Участок длины графиков	Средние величины:
$K(x,z) > 0,000$ $K(x) > 0,000$ $K(z) > ---$	$m(x,z) > 0,000$ $m(x) > 0,000$ $m(z) > ---$	Начало : 100 Конец : 120	$K(x,z) \text{ ср} = 6,760$ $K(x) \text{ ср} = 1,612$ $K(z) \text{ ср} = ---$

Имя файла	$K(x,z)_{\text{max}}$	$m(x,z)$	$K(x)_{\text{max}}$	$m(x)$	$K(z)_{\text{max}}$	$m(z)$	H min	H max
Образец 1	22,803	3,373	9,625	5,972	---	---	-91,9	106,8
Образец 2	16,445	2,433	4,625	2,869	---	---	-86,8	49,5
Образец 3	18,035	2,668	9,625	5,972	---	---	-143,1	22,5
Образец 4	29,682	4,391	28,875	17,915	---	---	-148,4	13,9
Образец 5	12,849	1,901	10,250	6,359	---	---	-144,0	10,0
Образец 6	16,283	2,409	12,625	7,833	---	---	-129,3	38,6
Образец 7	17,386	2,572	8,875	5,506	---	---	-142,6	15,0
Образец 8	13,175	1,949	12,625	7,833	---	---	-144,4	80,0

Всего отобрано файлов : из

б)



в)

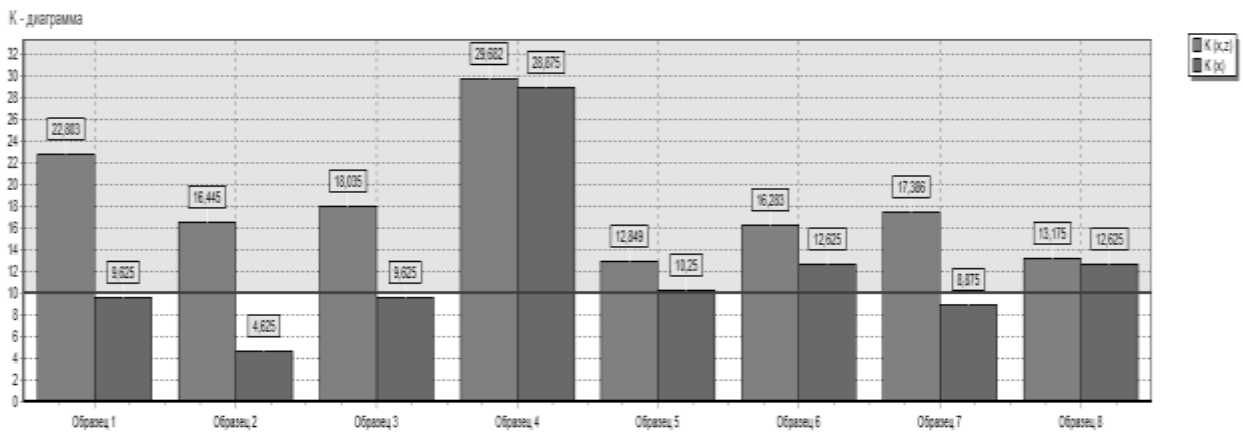
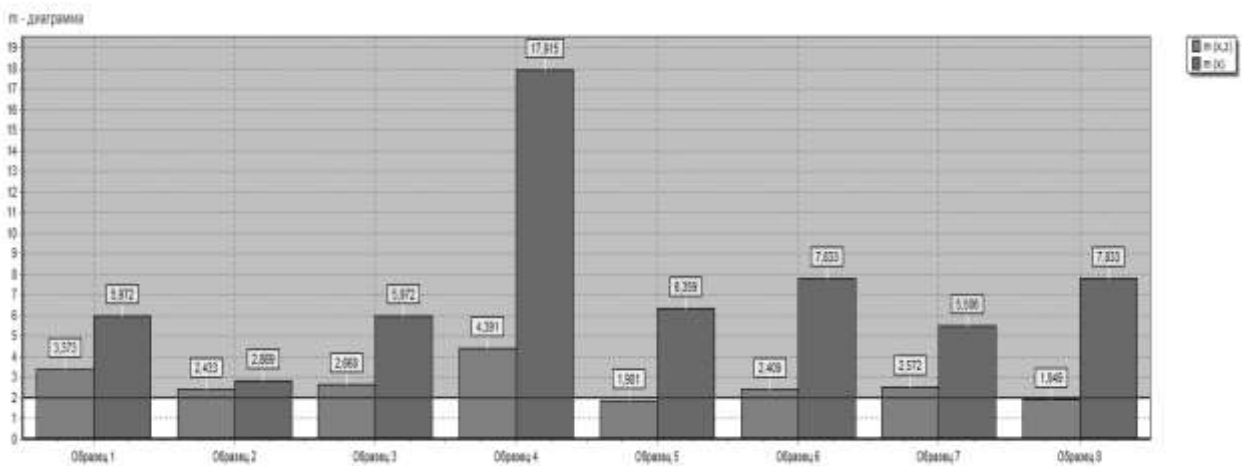


Рис. 6. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по ЗТВ (справа от шва)

а)



б)



в)

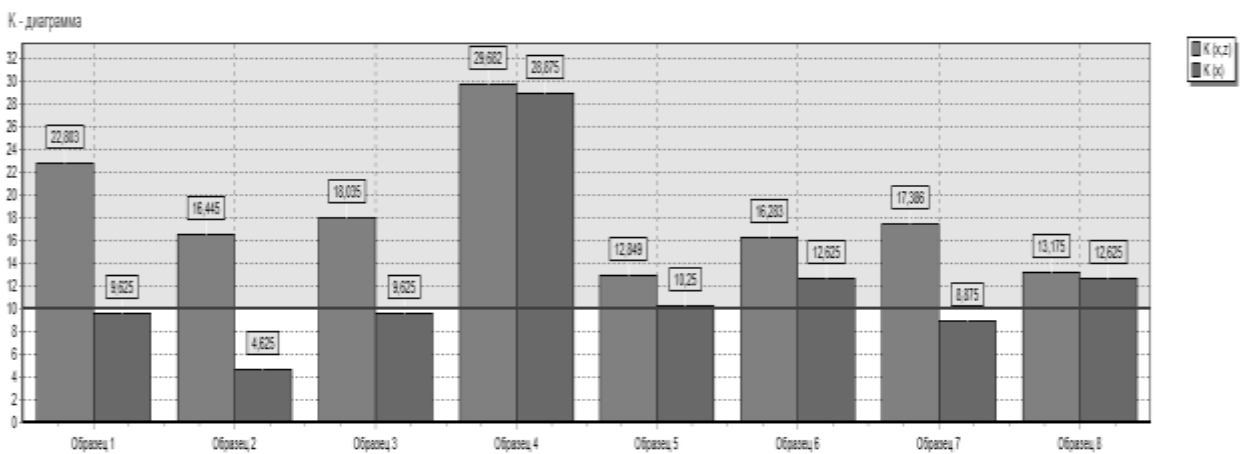


Рис. 7. Результаты общего компьютерного анализа (а); общая m-диаграмма (б) и K-диаграмма (в) по ЗТВ (слева от шва)

На рис. 8 приведены результаты измерения остаточных напряжений в локальных зонах сварного соединения – сварном шве (СШ) и ЗТВ – посредством рентгеновской дифрактографии.

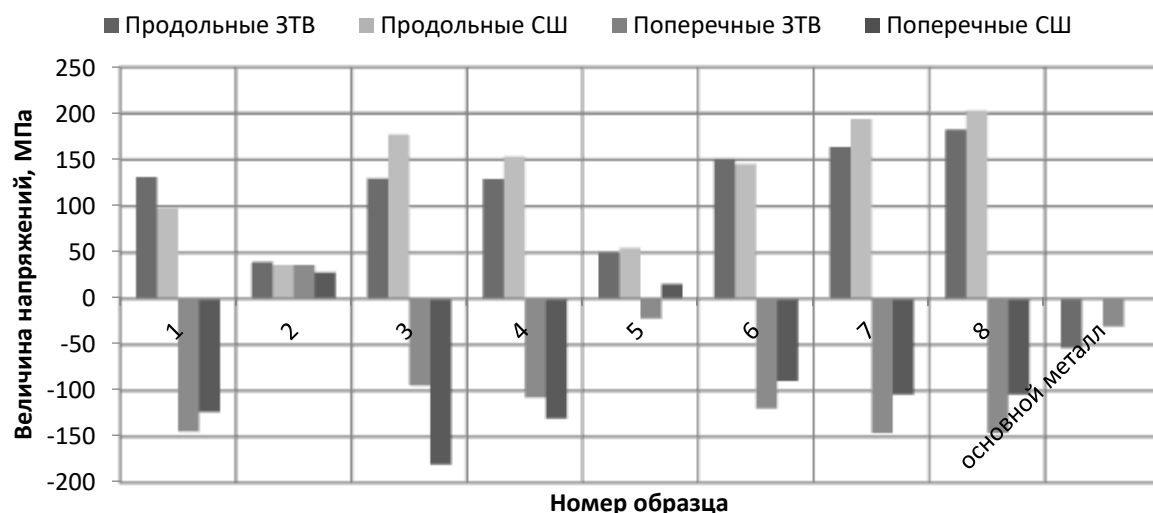


Рис. 8. Величины остаточных напряжений в зависимости от режима сварки образцов

Как видно, для основного металла остаточные напряжения в поперечном и продольном направлении являются сжимающими. Причём в поперечном направлении величина остаточных напряжений в 1,9 раз выше величины остаточных напряжений в продольном направлении: соответственно 53,47 МПа и 29,92 МПа.

Для всех образцов, как в шве, так и в околошовной зоне, в продольном направлении напряжения являются растягивающими. В поперечном направлении, в целом, выявлены сжимающие остаточные напряжения, исключение составили образец 2 (металл шва и ЗТВ) и металл шва образца 5, где напряжения оказались растягивающими.

Второй образец имеет минимальные значения остаточных напряжений в металле шва и ЗТВ, не превышающие 40 МПа, по значению сопоставимые с основным металлом, но с противоположным знаком, т. е. растягивающие.

Пятый образец также имеет невысокие значения величины остаточных напряжений и полностью соответствующие значения основного металла в продольном и поперечном направлении.

Сравнение результатов измерения величин остаточных напряжений методом МПМ и рентгеновской дифрактографией, в конкретных областях измерений, удовлетворительно сходятся по характеру изменения.

Выводы:

1. Метод магнитной памяти металла позволяет наглядно и экспрессно оценивать распределение остаточных напряжений по всей поверхности объекта контроля без его разрушения, определять зоны концентрации напряжений.

2. Плавление экспериментального флюса в процессе сварки вызвало интенсивное газообразование, проявляющееся в образовании крупной пористости металла шва и максимальном уровне остаточных напряжений при максимальных значениях силы сварочного тока (600 А) и напряжения на дуге (37 В), а сброс давления посредством организации отверстий на тех же режимах позволил исключить пористость и достигнуть минимума значений остаточных напряжений.

3. Во всех сварных образцах максимум градиента напряжений, вне зависимости от значений параметров режима сварки, наблюдается преимущественно по продольным граням, что может быть объяснено максимумом уровня их пластической деформации при протекании фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния.

4. Установлено, что для основного металла остаточные напряжения в поперечном и продольном направлении являются сжимающими. В поперечном направлении величина остаточных

напряжений в 1,9 раз выше, чем в продольном направлении. Для всех образцов в продольном направлении напряжения являются растягивающими. Исключение составляют образец 2 и металл шва образца 5, где напряжения оказались растягивающими. Вторым образцом имеет минимальные значения остаточных напряжений, не превышающие 40 МПа. Пятый образец также имеет невысокие значения величины остаточных напряжений. Сравнение результатов измерения величин остаточных напряжений методом МПМ и рентгеновской дифрактографией удовлетворительно сходится по характеру изменения.

5. Выявлен наиболее рациональный режим сварки стыковых соединений листовых образцов из низкоуглеродистой стали толщиной 5 мм при использовании экспериментального флюса при диаметре проволоки 3 мм: сила сварочного тока 450 А, напряжение на дуге 37 В и скорость сварки 54 см/мин. Такой режим обеспечивает хорошее формирование корневого и лицевого валиков, соответствующих размерами значениям ГОСТ 8713-70, соединения С4 и минимальный уровень остаточных напряжений, близкий к основному металлу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сварочных процессов: учеб. пособие / В. М. Неровный, А. В. Коновалов, Б. Ф. Якушин [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – 2-е изд. – М.: МГТУ им. Баумана, 2016. – 702 с.
2. Технология автоматической сварки под флюсом: [обзор / Н. Н. Потапов]. – М.: НИИЭинформэнерго-маш, 1980. – 27 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
4. Сидоров, В. П. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / В. П. Сидоров // Сварка и диагностика. – 2013. – № 3. – С. 20-23.
5. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / Н. В. Коберник, Г. Г. Чернышов, П. П. Гвоздев, А. А. Линник // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 24-27.
6. Обоснование выбора расчётной схемы для определения параметра термических циклов многодуговой сварки под слоем флюса / Л. А. Ефименко, А. П. Деркач, О. Е. Капустин, С. П. Севостьянов // Сварка и диагностика. – 2017. – № 6. – С. 26-27.
7. Бахматов, П. В. Бездеформационная сварка под слоем флюса стыковых соединений листовой судостроительной стали марки А / П. В. Бахматов, Е. Е. Тишкова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 47-53.
8. Технологии экспериментальных исследований: моногр. / А. С. Бубнов, С. А. Зайдес, Е. Ю. Кропоткина [и др.]; Иркутский государственный технический университет. Т. 1. – Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2011. – 255 с.
9. Сероштан, В. И. Неразрушающий контроль сварных соединений металлоконструкций грузоподъёмных машин / В. И. Сероштан, Р. А. Испирян // Известия ТулГУ. Подъёмно-транспортные машины и оборудование. – 2005. – Вып. 6. – С. 167-173.
10. Ким, В. А. Количественная оценка карбидной неоднородности быстрорежущих сталей с помощью компьютерной металлографии / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Учёные записки Комсомольско-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 105-111.
11. Власов, В. Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М.: ЗАО «Гиссо», 2004. – 424 с.
12. Дубов, А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учеб. пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 395 с.
13. Дубов, А. А. Проблемы контроля качества сварки и их решение на основе метода магнитной памяти металла / А. А. Дубов, С. М. Колокольников // Технология машиностроения. – 2005. – № 4. – С. 43-47.
14. Bakhmatov, P. V. Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev, B. M. Sobolev // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 65-76. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_8.