

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ И СОЕДИНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.791:658

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

П. В. Занковец

Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь,
e-mail:pzankovets@mail.ru

Поступила 07.10.2016 г.

Для условий единичного и мелкосерийного сварочного производства установлены доминирующие в формировании бездефектных сварных соединений факторы. С использованием математического моделирования и информационных технологий выполнены статистические и экспериментальные исследования для определения дефектности, образующейся по причинам каждого из доминирующих факторов. Изучение проходило при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде CO_2 , в смеси $CO_2 + Ar$ и аргонодуговой сваркой (РАДС) в аттестованных сварочных лабораториях базовых предприятий в соответствии с заданиями Государственных Программ научных исследований. В результате исследований подтверждены ранее полученные данные статистического анализа и установлено, что отрицательные параметры каждого доминирующего фактора являются причиной образования уникальной, присущей только этому фактору, структуры дефектности. Рассчитан удельный вес доминирующих факторов в формировании бездефектных сварных соединений трубопроводов с учетом их типоразмеров и способов сварки. В результате для условий единичного и мелкосерийного сварочного производства установлены закономерности образования дефектности сварных соединений, позволяющие осуществлять управление технологическими процессами сборочно-сварочных работ по алгоритму «структура дефектов – причина – фактор».

Введение. В результате исследований технологических процессов сборочно-сварочных работ выявлена зависимость выходного качества сварных соединений от определенных производственных факторов. Установлено, что при проведении сварочных работ на строительном объекте действует большое число различных факторов. К основным производственным факторам относятся квалификация исполнителей, подготовка и сборка под сварку, сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование, сварочный процесс, условия сварки, организация работ, термообработка, квалификация ИТР, время года, ритмичность работ. Каждый фактор представляет собой определенное состояние материалов, оборудования, исполнителей, условий и т. д., учитываемых конкретными параметрами при изготовлении статистически однородных партий

стыков. Факторные параметры, удовлетворяющие требованиям нормативно-технической документации (НТД) и технических условий (ТУ) и обеспечивающие ведение технологического процесса сборочно-сварочных работ без образования дефектности сварных соединений, назовем положительными. Отрицательные факторные параметры, вызывающие систематическое появление дефектности при сварке, будем называть факторными причинами или просто причинами дефектов. Установлено, что степень влияния каждого фактора на уровень качества различна как из-за разнородности сварных соединений, так и технологии их изготовления. Исходя из этого, исследование закономерностей образования дефектности и определение главных причин брака сварки возможно не вообще, а в конкретных производственных условиях для конкретных ба-

зовых совокупностей сварных соединений. Определение степени влияния этих факторов на выходное качество сварных соединений конкретных типоразмеров позволит оптимизировать сборочно-сварочное производство за счет укрепления и модернизации его слабых звеньев. Установление закономерностей и связей дефектности с причинами ее образования представляется важной задачей, решение которой позволит принимать превентивные меры по их устранению до начала сборочно-сварочных работ, совершенствовать технологические процессы и осуществлять

управление качеством сварки в режиме реального времени.

В результате выполненных исследований определены 5 факторов, оказывающих наибольшее влияние на формирование бездефектных сварных соединений, названных нами доминирующими. Это подготовка и сборка под сварку, квалификация сварщиков, сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование и сварочный процесс, генерирующие 90–97% образующейся дефектности в условиях единичного и мелкосерийного сварочного производства (табл. 1).

Таблица 1. Доминирующие в формировании бездефектных сварных соединений факторы и их основные параметры

Квалификация исполнителей	Подготовка и сборка	Сварочные материалы	Сварочное оборудование	Сварочный процесс
разряд	подготовка кромок (угол притупления, радиус скругления)	сварочно-технологические свойства	измерительные приборы	способ сварки
тренированность	зазор	условия хранения	состояние контактов	тип соединения
стаж	соосность	состояние покрытия	стабильность тока	сила тока, I
возраст	зачистка	внешний вид	стабильность напряжения	напряжение, U
состояние здоровья	прихватка	Ø электрода, проволоки	оснастка	термообработка

Учет, контроль и анализ состояния сварочно-монтажных работ. Разработка и создание баз данных и знаний позволяет создать историю качества сварочно-монтажных работ и проводить исследования закономерностей образования дефектности сварных соединений на основе данных неразрушающих методов контроля и экспертных оценок по показателям протяженности – L и количеству – D по конкретным базовым совокупностям стыков (БС) как за период (день, неделя, месяц, квартал, год), так и по другим составляющим сборочно-сварочного производства – монтажной организации, объекту сварки, этапу, конструктивному элементу, сварщику. На рис. 1, 2 представлены примеры работы компьютерной системы по учету, контролю и анализу качества сборочно-сварочных работ и сварных соединений.

Для подтверждения полученных результатов и установления структур образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений при отрицательных параметрах доминирующих производственных факторов были проведены экспериментальные исследования.

Исследования проходили при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде угле-

кислого газа ($МП + CO_2$), в смеси $CO_2 + Ar$ ($МП + CO_2 + Ar$) и аргонодуговой сваркой (РАДС) в аттестованных сварочных лабораториях базовых предприятий в соответствии с заданиями Государственных Программ научных исследований. Определение дефектности производили по данным неразрушающих методов контроля (НМК) – визуального (ВК), рентгенографического (РГГ) и ультразвукового (УЗК) [1, 2, 9, 21–25]. Согласно назначению и ответственности данных объектов выполнялся 100 %-ный объем контроля. В случае, когда сварное соединение забраковывалось, после устранения дефектов оно подвергалось повторному контролю [3, 4, 6–9].

Согласно формулам дефектности базовой совокупности, структура дефектности по причинам определяется следующим образом [1, 2, 3, 8, 10]:

$$ДП = \frac{\sum D_o}{\sum n} = \frac{\sum П}{\sum n} + \frac{\sum Ш}{\sum n} + \frac{\sum Н}{\sum n} + \frac{\sum \Phi_{ш}}{\sum n} + \frac{\sum Пр}{\sum n}, \quad (1)$$

где ДП – доминирующая причина в структуре дефектности; D_o – общее количество дефектов; n – количество проконтролированных участков; П – поры и их скопления (СПШ); Ш – шлаковые включения; Н – непровары (в корне шва, по кромке, между слоями); $\Phi_{ш}$ – дефекты формы шва; Пр – прочие дефекты.

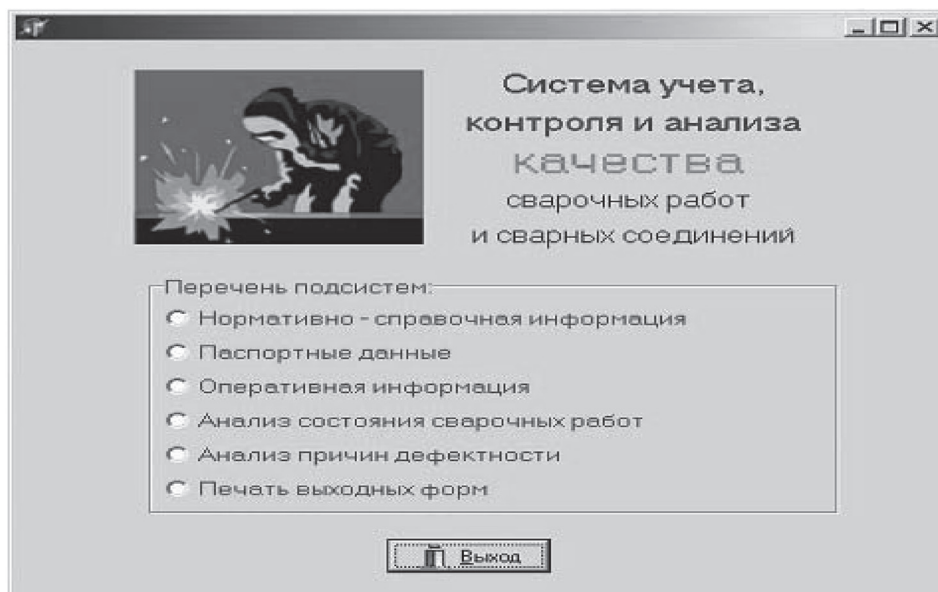


Рис. 1. Головное меню системы

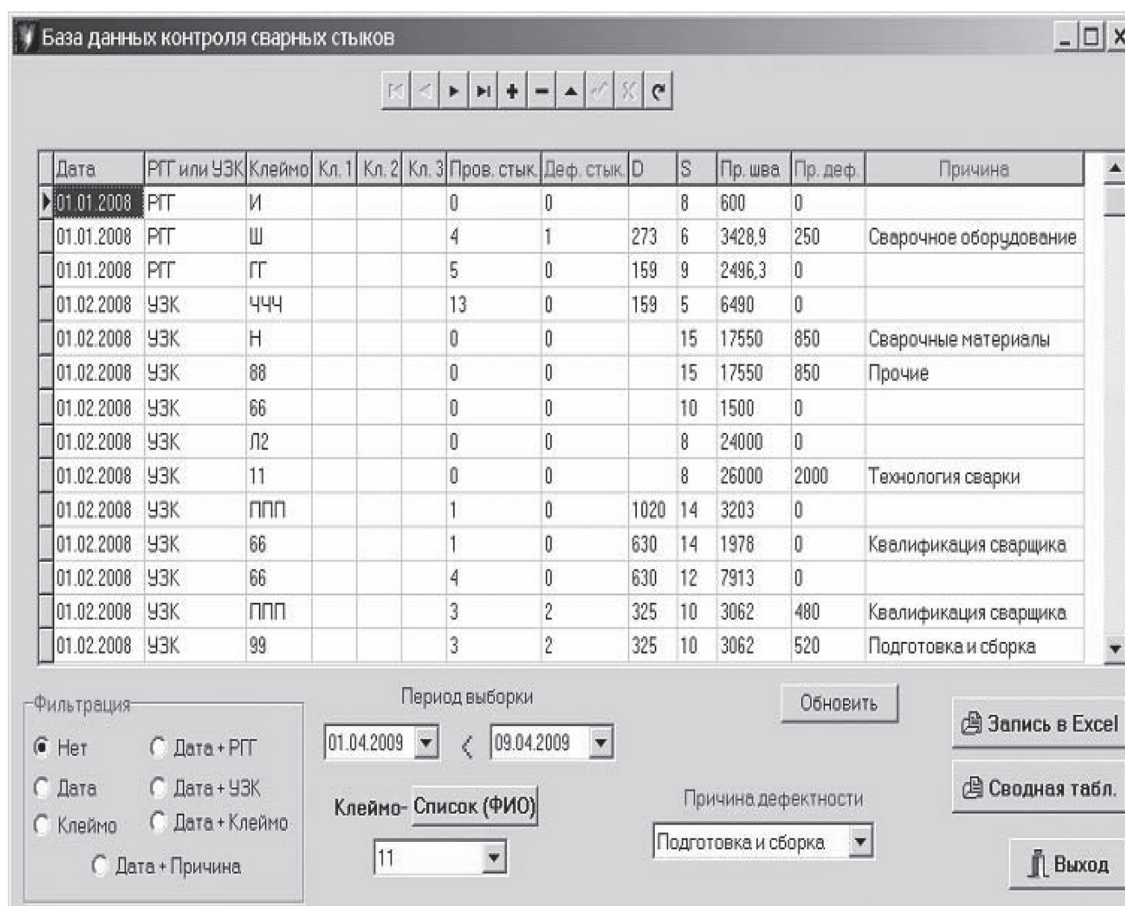


Рис. 2. Пример работы с базой данных о состоянии качества сварочных работ и причинах дефектности сварных соединений

Закономерности формирования сварных соединений при отрицательных параметрах доминирующих факторов. В результате экспериментальных исследований технологических процессов формирования сварных соединений подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что отрицательные параметры доминирующих факторов являются причинами уникальной, только им присущей структуры дефектности [1, 3, 5, 7–11, 13, 14, 16–20].

В табл. 2 приведены результаты дефектности, образующейся по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» (ПС). Видно, что в общей структуре дефектности преобладают дефекты типа «непровар» – 2,1 на участок контроля, шлаковые включения, поры и их скопле-

ния, а также различные дефекты формы шва. Эти причины генерируют от 82,1 до 94 % образующихся дефектов. Установлено, что при сварке труб малых диаметров дефектность возникает главным образом из-за плохой зачистки шва, околшовной зоны и подготовки кромок, а на больших диаметрах она формируется в основном из-за несоблюдения нормативных требований по установке необходимого зазора и соосности между свариваемыми элементами. Дефекты формы шва образуются, как правило, из-за смещения стыков в результате нарушения технологии постановки прихваток, а также неудовлетворительной зачистки шва и околшовной зоны. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка», представлена на рис. 3.

Таблица 2. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» при разлаженном технологическом процессе

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт/%	Выявлено дефектов, шт.				
			Поры и их скопления, всего/шт. уч	Шлаковые включения, всего/шт. уч	Непровары, всего/шт. уч	Дефекты формы шва, всего/шт. уч	Прочие, всего/шт. уч
РДС	9930	4900/52	24235/1,9	26406/2,1	27905/2,3	18825/1,7	11540/1,0
МП + CO ₂	2180	887/41	10505/2,7	10575/2,7	6475/1,7	7080/1,9	4850/1,3
МП+CO ₂ +Ar	4210	2423/59	9770/1,3	10120/1,4	20755/2,7	14835/1,9	9700/1,3
РАДС	4210	2164/52	5990/0,8	5800/0,8	13690/1,7	3700/0,5	4960/0,7
Итого	20530	10374/51	50500/1,7	52501/1,8	68825/2,1	44440/1,5	31050/1,1

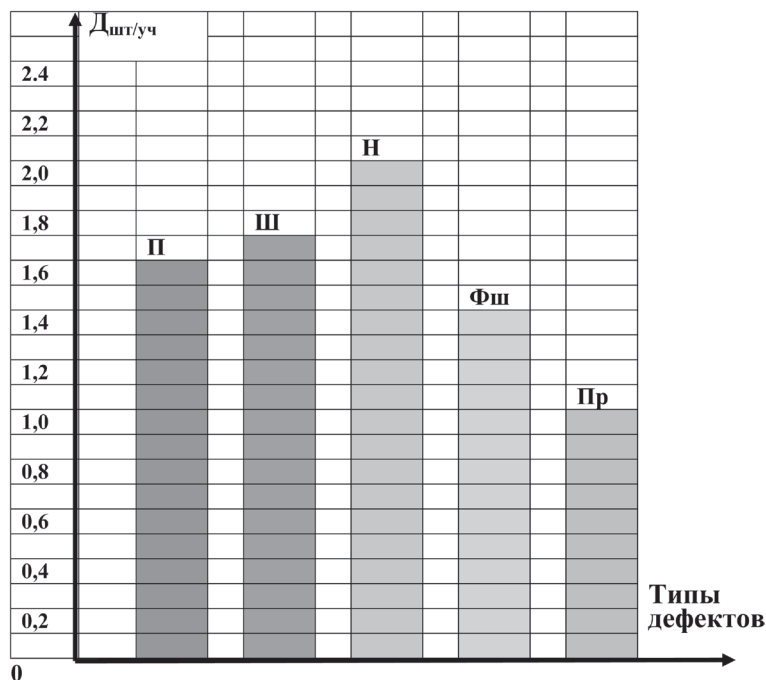


Рис. 3. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при сварке стыков трубопроводов

Полученные результаты исследований позволяют определить общий удельный вес влияния фактора на уровень качества сварных соединений конкретных типоразмеров в разрезе способов сварки, марок свариваемых материалов и условий сварочного процесса. Влияние технологического процесса подготовки и сборки под сварку при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров приведено в табл. 3.

Установлено, что удельный вес фактора «Подготовка и сборка» в формировании бездефектных сварных соединений последовательно возрастает с увеличением диаметров трубопроводов независимо от способов сварки [16, 19, 26]. Так, при сварке трубопроводов диаметром 57 мм

удельный вес фактора составляет 18 %, а при сварке трубопроводов диаметром 500 мм возрос до 34,1 %. С увеличением диаметров трубопроводов возрастает и толщина сварных соединений, сварка осуществляется за несколько проходов, причем выполняется контроль качества каждого слоя. Соответственно становится более сложным соблюдение нормативных требований по установке зазора и соосности, для этого требуется вспомогательное оборудование – кантователи, вращатели, струбцины, зажимы и т. п. Например, при изготовлении сварных соединений магистральных трубопроводов трудоемкость подготовки и сборки под сварку составляет, по разным оценкам, от 65 до 86 % всего технологического процесса сборочно-сварочных работ.

Таблица 3. Влияние подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений технологических трубопроводов

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	11	18,0
МП+CO ₂	89	4,0	20Х	1270	73	94,3	18	24,6
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	93,7	84	23,3
МП+CO ₂ +Ar	112	6,0	20Х	4300	290	93,3	73	25,3
РДС	112	6,0	14ХГС	2790	215	92,3	64	29,7
РАДС	289	10,0	14ХГС	2900	235	91,9	74	31,5
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	91,2	44	33,2
РДС	500	14,0	14ХГС	1790	167	90,7	57	34,1
Итого				21540	1533	92,7	425	27,7

Исследования закономерностей образования дефектности по фактору «Сварочные материалы» (СМ) выполняли аналогичным образом. В табл. 4 приведены данные о дефектности, генерируемой по причинам некачественных сварочных материалов. В отличие от фактора «Подготовка и сборка» непровары, дефекты формы шва и прочие дефекты здесь довольно редки – от одного до двух на 10 участков контроля.

Из диаграммы, представленной на рис. 4, видно, что в структуре дефектности по причинам фактора «Сварочные материалы» преобладают

дефекты – поры и их скопления – 1,6; шлаковые включения – 1,4 на участок контроля. Установлено, что структура образующейся дефектности при разных отрицательных параметрах фактора отличается незначительно и имеет общие закономерности, позволяющие при сварке конкретных типоразмеров сварных соединений, способов сварки, свариваемых материалов и условий сварки (БС) использовать их для повышения качества сварных соединений в каждом конкретном случае.

Таблица 4. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Сварочные материалы» при разлаженном технологическом процессе

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Проконтролировано участков L = 300 мм, шт.	Выявлено дефектов, шт.				
			Поры и их скопления	Шлаковые включения	Непровары	Дефекты формы шва	Прочие
РДС	2100	5880	9410	8230	1170	1730	1760
МП+CO ₂	2300	6210	8700	8450	1350	1430	1280
МП+CO ₂ +Ar	1850	5360	8040	7240	1070	1240	1210
РАДС	1550	4650	7200	6040	700	1160	1220
Итого	7800	22100	33350	29960	4290	5560	5470

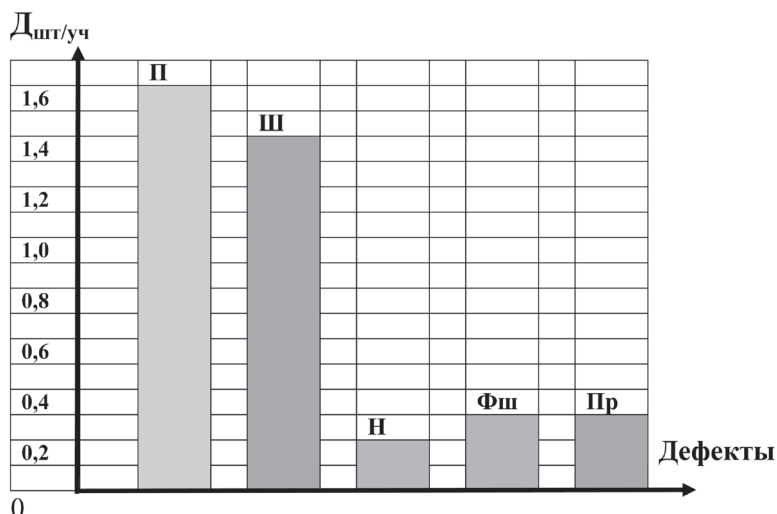


Рис. 4. Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Сварочные материалы» при сварке трубопроводов

В результате исследования причин образования дефектности по фактору «Сварочные материалы» установлено, что доминирующими причинами, генерирующими 59,8 % дефектов сварочных материалов, являются их сварочно-технологические свойства и прочность (адгезия) покрытия электродов и проволоки, что подтверждает важное значение правильного выбора сварочных материалов при сварке конкретных марок сталей и их сплавов. Однако и другие параметры фактора также в определенной мере, а в общей сложности в 40,8 % случаях, могут генерировать брак сварных соединений. Этот важный вывод позволяет по каждой БС стыков до

начала их изготовления, или в оперативном режиме принимать обоснованные решения по повышению уровня качества сварочных материалов, что автоматически увеличивает и выходной уровень качества изготавливаемых сварных соединений [11, 12, 14, 15, 25].

Полученные данные также дают возможность определить общий удельный вес влияния фактора «Сварочные материалы» на уровень качества сварных соединений конкретных типоразмеров в разрезе способов сварки, марок свариваемых материалов и условий сварочного процесса, табл. 5.

Таблица 5. Влияние сварочных материалов на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	14	23,0
МП+СО ₂	89	4,0	09Г2	1270	73	90,7	16	21,9
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	92,3	76	21,1
МП+СО ₂ +Ar	112	6,0	14ХГС	4300	290	93,7	71	24,5
РДС	112	6,0	14ХГС	2790	215	91,2	57	26,5
РАДС	289	10,0	20Х	2900	235	94,3	56	23,8
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	93,3	27	20,5
РДС	500	14,0	20Х	1790	167	91,2	34	20,4
Итого				21540	1533	92,7	351	22,9

Сварочное оборудование (СО) является одним из доминирующих факторов в формировании качества конечного продукта – сварного соединения. В табл. 6 приведены данные резуль-

татов исследования дефектности, генерируемой по причинам некачественного сварочного оборудования. Из табл. 6 видно, что в структуре дефектности по причинам фактора «Сварочное

оборудование» явного преобладания тех или иных дефектов нет, хотя присутствуют практически все основные технологические дефекты – поры и их скопления, шлаковые включения, непровары, различные дефекты формы шва и некоторые другие. Однако и в этом случае установлено, что каждый отрицательный параметр фактора явля-

ется причиной уникальной, только ему присущей структуры дефектности. Доминирующими причинами являются некачественная оснастка – 28,2 % и нарушение стабильности тока – 25,0 %. Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Сварочное оборудование», представлена на рис. 5.

Таблица 6. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Сварочное оборудование» при разлаженном технологическом процессе

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Проконтролировано участков $L = 300$ мм, шт.	Выявлено дефектов, шт.				
			Поры и их скопления	Шлаковые включения	Непровары	Дефекты формы шва	Прочие
РДС	2100	5880	4530	3740	3210	2730	1350
МП+CO ₂	2300	6210	5620	4850	3460	2970	1580
МП+CO ₂ +Ar	1850	5360	3810	3480	2530	2380	1240
РАДС	1550	4650	3150	3270	1820	1790	1370
Итого	7800	22100	17110	15340	11020	9870	5540

Таким образом, установлено, что структура образующейся дефектности при разных отрицательных параметрах фактора отличается незначительно и имеет общие закономерности, позволяющие при сварке конкретных типоразмеров сварных соединений, способов сварки, свариваемых материалов и условий сварки использовать их для принятия обоснованных управляющих воздействий на замену или модернизацию сварочного оборудования и повышение качества сварных соединений [6 – 9, 22, 23, 26].

В табл. 7 приведены результаты исследования удельного веса влияния сварочного оборудования на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов различных ти-

поразмеров при их изготовлении разными способами сварки.

Из табл. 7 видно, что из 1533 забракованных стыков различных типоразмеров по причинам фактора «Сварочное оборудование» забраковано 124 стыка, а средний удельный вес фактора в формировании бездефектных сварных соединений составляет 8,1 %. Вместе с тем установлено, что применение оборудования для механизированных способов сварки в защитных газах позволяет повысить качество сварных соединений и снизить брак по этому фактору в сравнении с ручной дуговой сваркой с 10 до 6 % соответственно.

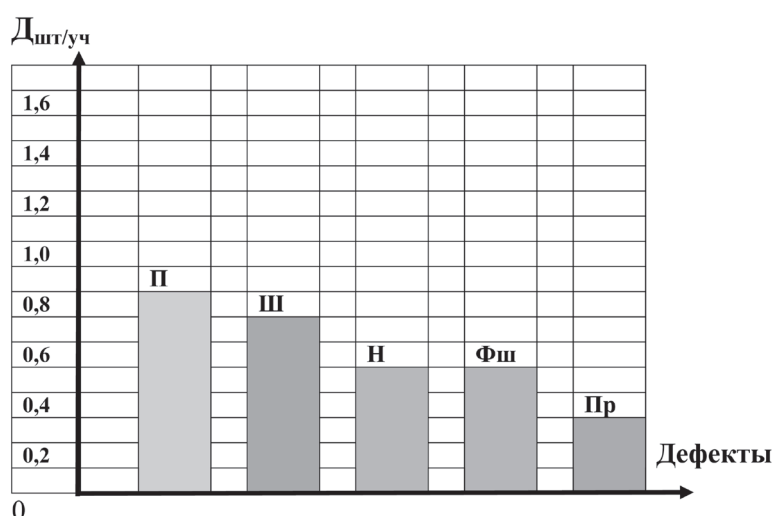


Рис. 5. Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Сварочное оборудование» при сварке трубопроводов

Таблица 7. Влияние сварочного оборудования на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	6	9,8
МП+CO ₂	89	4,0	09Г2	1270	73	90,7	7	9,6
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	92,3	32	8,9
РДС	112	6,0	14ХГС	4300	290	93,7	29	10,0
МП+CO ₂ +Ar	112	6,0	14ХГС	2790	215	91,2	12	5,6
РАДС	289	10,0	20Х	2900	235	94,3	14	6,0
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	93,3	9	6,8
РДС	500	14,0	20Х	1790	167	91,2	15	9,0
Итого				21540	1533	92,7	124	8,1

Сварочный процесс является завершающим этапом и одним из доминирующих в формировании сварных соединений факторов, поэтому правильный выбор его основных и дополнительных параметров для изготовления бездефектных сварных соединений различного назначения и ответственности имеет очень важное значение. Со сварочным процессом взаимосвязаны остальные доминирующие факторы – подготов-

ка и сборка под сварку, сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование и квалификация сварщиков. Вместе с тем брак, допущенный по причинам этого фактора, также приводит к специфическим дефектам. В табл. 8 приведены данные результатов исследований дефектности, генерируемой по причинам нарушения установленной технологии сварочного процесса.

Таблица 8. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Сварочный процесс»

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Проконтролировано участков L = 300 мм, шт.	Выявлено дефектов, шт.					
			Поры и их скопления	Шлаковые включения	Непровары	Трещины	Дефекты формы шва	Прочие
РДС	2100	5880	3240	2970	2050	3030	1100	920
МП+CO ₂	2300	6210	2910	3020	2360	2970	1060	850
МП +CO ₂ +Ar	1850	5360	2580	2630	2140	2100	870	740
РАДС	1550	4650	2140	1970	1630	1480	560	490
Итого	7800	22100	10870	10590	8180	9580	3590	3000

Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора, представлена на рис. 6. Видно, что в структуре дефектности по причинам фактора «Сварочный процесс» явного преобладания тех или иных дефектов нет, однако образуются специфические дефекты типа «трещина» (Т) – 0,7 на участок контроля, а также основные технологические дефекты – поры и их скопления – 0,6; шлаковые включения – 0,8; непровары – 0,4; дефекты формы шва – по 0,4 на участке шва. Основными причинами образования дефектности являются нарушение режимов сварки – 35,0 %, условий сварки – 30,5 %, а также нарушение нормативных требований предварительного подогрева и отпуска после формирования сварного шва (термообработка) – 19,8 %.

Таким образом, установлено, что структура образующейся дефектности при разных отрицательных параметрах фактора отличается незначительно и имеет общие закономерности, позволяющие при сварке конкретных типоразмеров сварных соединений, способов сварки, свариваемых материалов и условий сварки (БС) использовать их для принятия обоснованных управляющих воздействий на совершенствование сварочного процесса.

В табл. 9 приведены результаты исследования удельного веса влияния сварочного процесса на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров при их изготовлении разными способами сварки.

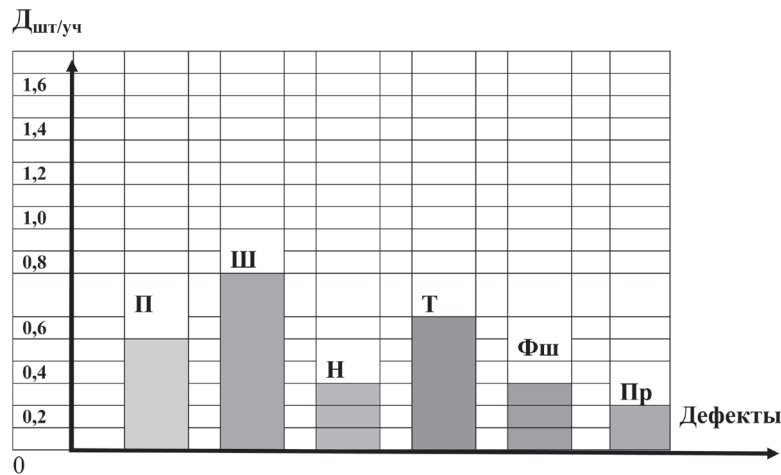


Рис. 6. Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Сварочный процесс» при сварке трубопроводов

Квалификация сварщика является одним из важнейших факторов, определяющих уровень качества сварных соединений. Среди некоторых специалистов существует точка зрения, что от квалификации сварщика полностью зависит фор-

мирование бездефектных сварных соединений. Однако выполненные нами исследования показали, что это далеко не так, хотя удельный вес его влияния на выходной уровень качества сварных соединений, безусловно, значителен.

Таблица 9. Влияние сварочного процесса на уровень качества сварных соединений трубопроводов

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	5	8,2
МП+СО ₂	89	4,0	09Г2	1270	73	90,7	6	8,2
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	92,3	22	6,1
МП +СО ₂ +Аг	112	6,0	14ХГС	4300	290	93,7	23	7,9
РДС	112	6,0	14ХГС	2790	215	91,2	15	7,0
РАДС	289	10,0	20Х	2900	235	94,3	12	5,1
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	93,3	7	5,3
РДС	500	14,0	20Х	1790	167	91,2	13	7,8
Итого				21540	1533	92,7	103	7,0

С другой стороны, сварщик является решающим фактором, завершающим сложный технологический процесс изготовления сварных соединений. Именно поэтому каждый сварщик в законодательном порядке аттестуется на право выполнять сварочные работы конкретным способом сварки и на изготовление конкретных сварных конструкций. Установлены жесткие нормативные требования по присвоению квалификационного разряда сварщику и его переаттестации через определенные промежутки времени. В обязательном порядке должны проводиться предобъектные испытания аттестованных сварщиков на образцах и условиях, аналогичных

объекту сварки. Положения контрольных сварных соединений при этом должны соответствовать тем, в которых сварщику предстоит выполнять производственные сварные соединения. При сварке контрольных сварных соединений сварщик должен выполнить все требования карты технологического процесса, которые могут разрабатываться на группу однотипных сварных соединений или на конкретные сварные соединения. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Квалификация сварщика», приведена в табл. 10.

Из табл. 10 и диаграммы, представленной на рис. 7, видно, что в структуре дефектности по

причинам фактора «Квалификация сварщика» преобладают дефекты формы шва – по 1,5 на участке контроля, а также присутствуют основные технологические дефекты – поры и их скопления – 1,0; шлаковые включения – 1,0; непровары – 0,8 и прочие дефекты. Доминирующими причинами являются тренированность изготовления конкретных сварных соединений – 33,7 %, разряд – 24,8 % и состояние здоровья сварщика – 17,8 %.

Анализ причин дефектности показывает, что с увеличением диаметров сварных соединений трубопроводов возрастает роль профессионализма сварщика – его разряд и полученное образование. Большой удельный вес тренированности сварщика объясняется прежде всего нарушением ритмичности сварочных работ, большими перерывами в изготовлении сварных соединений конкретных типоразмеров, что влечет потерю навыков.

Таблица 10. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Квалификация сварщика»

Способ сварки	Сварено стыков, шт.	Проконтролировано участков $L = 300$ мм, шт.	Выявлено дефектов, шт.				
			Поры и их скопления	Шлаковые включения	Непровары	Дефекты формы шва	Прочие
РДС	2100	5880	5240	5370	4790	7860	2250
РДС+CO ₂	2300	6210	5870	6120	5230	8340	2610
РДС+CO ₂ +Ar	1850	5360	4820	4190	3750	7580	2170
РАДС	1550	4650	4230	3980	2780	6710	1940
Итого		22100	20160	19660	16550	30490	8970

Таким образом, установлено, что структура образующейся дефектности при разных отрицательных показателях квалификации сварщика отличается незначительно и имеет общие закономерности, позволяющие при сварке конкретных типоразмеров сварных соединений, способов сварки, свариваемых материалов и условий сварки (БС) использовать полученные данные для создания истории качества изготовления сварных соединений по каждому сварщику и принятия обоснованных управляющих воздействий. Эти результаты дают возможность назначать на

сварку конкретных объектов сварщиков, имеющих лучшие показатели качества [9–12, 14, 24, 27–33].

В табл. 11 представлены результаты исследования влияния квалификации сварщика на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров при их изготовлении разными способами сварки. Видно, что квалификация сварщика имеет наибольший удельный вес на формирование качества сварных соединений при сварке труб

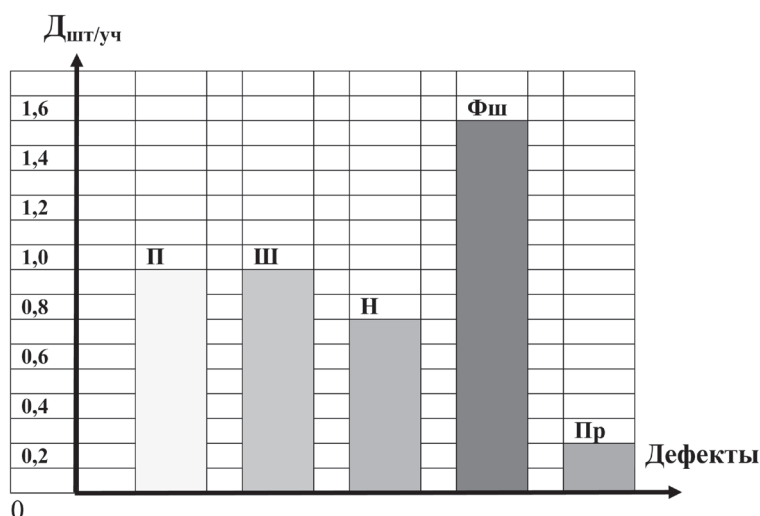


Рис. 7. Структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Квалификация сварщика» при сварке трубопроводов

малых диаметров – 34,4 % и больших (500 и более мм) – 32,9 %. Установленная закономерность объясняется тем, что при сварке труб малых диаметров подготовка и сборка под сварку, за редким исключением, не представляет сложности, образование дефектности по причинам этого фактора, а следовательно и удельный вес влияния

на качество незначительны, поэтому значение фактора сварщика возрастает. С другой стороны, при сварке труб больших диаметров фактор «Подготовка и сборка» имеет большое значение также, как и квалификация сварщика, изготавливающего в данном случае сварной шов за несколько проходов.

Таблица 11. Влияние квалификации сварщика на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов

Способ сварки	Диаметр трубопровода, мм	Толщина стали, мм	Марка стали	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, всего, шт.	Уровень качества, %	Забраковано стыков по фактору, всего, шт.	Удельный вес фактора, %
РДС	57	2,5	09Г2	1250	61	95,1	21	34,4
РДС+CO ₂ +Ar	89	4,0	09Г2	1270	73	90,7	20	27,4
РАДС	89	4,0	14ХГС	5740	360	92,3	101	28,1
РДС+CO ₂ +Ar	112	6,0	14ХГС	4300	290	93,7	79	27,2
РДС	112	6,0	14ХГС	2790	215	91,2	53	24,7
РАДС	289	10,0	20Х	2900	235	94,3	62	26,4
РДС	289	10,0	20Х	1500	132	93,3	37	28,0
РДС	500	14,0	20Х	1790	167	91,2	55	32,9
Итого				21540	1533	92,7	428	27,9

Заключение. В результате выполненных статистических и экспериментальных исследований установлено, что влияние доминирующих факторов при изготовлении различных сварных соединений значительно колеблется, причем среди них всегда есть один или два, которые вносят разладку в технологический процесс сварки и больше других снижают выходной уровень качества и, следовательно, общий технический уровень. Например, при РДС стыков труб диаметром 57 мм доминирующие факторы – квалификация сварщика с удельным весом в образовании дефектности 34,4 % и сварочные материалы – 23,0 %. В то же время доминирующие факторы при сварке труб диаметром 500 мм – подготовка и сборка – 34,1 % и квалификация сварщиков – 32,9 %. Действительно, при сварке труб малых диаметров удельный вес квалификации сварщика в выходном качестве сварных соединений очень большой, а подготовка и сбор-

ка под сварку не создает проблем. С другой стороны, сварка стыков труб больших диаметров сопряжена с проблемами подготовки и сборки, сварки в несколько слоев, зачистки каждого слоя и его контроля. Поэтому и удельный вес этого фактора в выходном качестве сварных соединений доминирующий. Таким образом, в отрасли сварочно-монтажного производства системный анализ позволяет установить закономерности формирования бездефектных сварных соединений и оценить эффективность использования сварочного основного и вспомогательного оборудования, сварочных и свариваемых материалов, сварочного процесса, квалификации сварочного персонала, выявить недостатки в общем технологическом процессе и наметить пути решения проблем. Моделирование процессов дает возможность выбрать их оптимальные параметры и тем самым способствовать повышению эффективности и качества сварки в целом.

Литература

1. **Занковец, П. В.** Математическое моделирование влияния производственных факторов на образование дефектов сварных соединений / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. тр. 2-й Междунар. конф. – Киев, 2004. – С. 95–98.
2. **Совершенствование** технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец [и др.]. – Минск, 2004. – 343 с.
3. **СТБ ISO/TR 15608-2010.** Сварка. Руководство по системе группирования металлических материалов.
4. **ГОСТ 5264-80.** Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.

5. **Занковец, П. В.** Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений / П. В. Занковец, Г. Н. Здор, В. К. Шелег // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2006. – № 2. – С. 107–113.
6. **СТБ ISO 15609-1-2009.** Технологическая инструкция и квалификация технологических процессов сварки металлических материалов. Инструкция на технологический процесс сварки. Ч. 1. Дуговая сварка.
7. **СТБ ISO 5817-2009.** Сварка. Соединения стали, никеля, титана и их сплавов, выполненные сваркой плавлением (кроме лучевой сварки). Уровни качества шва в зависимости от дефектов.
8. **СТБ ISO 6520-1-2009.** Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов по геометрическим параметрам в металлических материалах. Ч. 1. Сварка плавлением.
9. **СТБ SEN/TR 15235-2012.** Сварка. Методы оценки дефектов в металлических конструкциях.
10. **Занковец, П. В.** Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций / П. В. Занковец // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2007. – № 2. – С. 120–128.
11. **СТБ ISO 2560-2009.** Материалы сварочные присадочные. Электроды металлические покрытые для ручной дуговой сварки нелегированных и мелкозернистых сталей. Классификация.
12. **СТБ ISO 3580-2007.** Материалы сварочные присадочные. Электроды металлические покрытые для ручной дуговой сварки теплоустойчивых и жаростойких сталей. Классификация.
13. **Занковец, П. В.** Оптимизация качества и конкурентоспособности сварочной продукции на основе математического моделирования причинно-следственных связей образования дефектов сварных соединений / П. В. Занковец // *Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. тр. 4-й Междунар. конф.* – Киев, 2009. – С. 17–22.
14. **Занковец, П. В.** Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // *Трубопроводный транспорт (теория и практика).* – Москва, 2010. – № 4. – С. 24–27.
15. **ГОСТ 9467-75.** Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы.
16. **Занковец, П. В.** Исследование влияния подготовки и сборки под сварку на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов / П. В. Занковец // *Автоматическая сварка.* – Киев, 2011. – № 6. – С. 48–53.
17. **Занковец, П. В.** Основы формирования бездефектных сварных соединений в условиях мелкосерийного и единичного сборочно-сварочного производства / П. В. Занковец // *Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симп.* – Минск, 2012. – С. 49–54.
18. **Фомихина, И. В.** Исследование влияния режимов сварки и дефектности сварных соединений сосудов для хранения масла и нефти, находящихся под давлением, на склонность к деформационному старению / И. В. Фомихина, П. В. Занковец, Ю. О. Лисовская // *Сварка и родственные технологии.* – 2008. – № 10. – С. 112–116.
19. **Занковец, П. В.** Исследование влияния доминирующих производственных факторов на качество сварных соединений / П. В. Занковец // *Инженерия поверхностей, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. Междунар. симп.* – Минск, 2009. – С. 297–304.
20. **СТБ SEN/TR 15135-2013.** Сварка. Проектирование и неразрушающий контроль сварных швов.
21. **СТБ EN 970-2003.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Визуальный метод.
22. **СТБ EN 1435-2004.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Радиографический метод контроля сварных соединений, выполненных сваркой плавлением.
23. **СТБ EN 1712-2004.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Границы допустимости.
24. **СТБ EN 1713-2005.** Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Характеристика дефектов сварных швов.
25. **Занковец, П. В.** Исследование влияния сварочных материалов на уровень качества сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // *Технологии, оборудование, качество: сб. докл. Междунар. симп.* – Минск, 2009. – С. 65–66.
26. **Занковец, П. В.** Исследование и количественная оценка влияния подготовки и сборки под сварку на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов / П. В. Занковец // *Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симп.* – Минск, 2010. – С. 42–47.
27. **Занковец, П. В.** Использование информационных технологий в исследовании влияния производственных факторов на качество изготовления сварных соединений стальных трубопроводов в полевых условиях / П. В. Занковец, А. Ф. Ильющенко, В. К. Шелег // *Технология, оборудование, качество: сб. докл. 14 Междунар. симп.* – Минск, 2011. – С. 171–172.
28. **Занковец, П. В.** Информационные технологии в сварке как средство энерго- и ресурсосбережения / П. В. Занковец, Г. А. Иванов, В. Н. Прончева // *Технологии. Оборудование. Качество: сб. докл. 15 Междунар. симп.* – Минск, 2012. – С. 115–116.
29. **Занковец, П. В.** Управление качеством сварочных работ и сварных соединений по алгоритму «Дефект – Причина – Фактор» / П. В. Занковец // *Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение: сб. докл. респ. конф.-семинара.* – Минск, 2014. – С. 51–57.
30. **Занковец, П. В.** Компьютерная система расчета норм расхода сварочных материалов на сварку стальных трубопроводов / П. В. Занковец, Г. А. Иванов, В. Н. Прончева // *Трубопроводный транспорт (теория и практика).* – М., 2007. – № 4. – С. 54–56.

31. **Иванов, Г. А.** Автоматизация нормирования расхода сварочных материалов при строительстве и ремонте стальных трубопроводов / Г. А. Иванов, П. В. Занковец, В. Н. Прончева // Сварка и родственные технологии. – 2008. – № 10. – С. 56–58.

32. **Zankovets, P. V.** Level of effect of preparation end assembly for welding on quality of welded joints for industrial pipelines / P. V. Zankovets // The Paton welding journal. – 2011. – № 6. – P. 40–44.

33. **Занковец, П. В.** Информационно-аналитические системы в обеспечении качества сварочных работ / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение: сб. докладов III межотраслевой науч.-практ. конф. – Министерство строительства и архитектуры. – Минск, 2016. – С. 143–149.

INVESTIGATING THE REGULARITIES IN FORMATION OF WELDED CONNECTIONS DEFECTIVENESS UNDER THE CONDITIONS OF INDIVIDUAL AND SHORT-RUN WELDING FABRICATION

P. V. Zankovets

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail:pzankovets@mail.ru*

Dominated factors in forming of defectless welded joints were established for individual and low-volume welding production. With use of mathematical simulation and information technologies, statistical and experimental study in defectiveness was performed for each of dominated factors. Research were conducted during construction of technological pipelines of different sizes with shielded arc welding (SAW), GMAW in CO₂ and Ar + CO₂ and GTAW. Welding was performed at certified production welding laboratories in accordance with tasks of the State Programs in scientific research. Results confirmed data from previous study in statistical analyzing of defects occurring and concluded, negative factors of joint preparation are cause of forming of defectiveness structure forming which is unique, related to this only factor. Fraction of dominating factors for forming of defectless welded joints in pipelines of different size and for different welding methods was calculated. As a result, regularity of defectless welded joints forming was established for individual and low-volume production. That allowed monitoring of production welding technological processes using connection «structure defect – cause – factor».