

П. В. Занковец

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПОДГОТОВКИ И СБОРКИ ПОД СВАРКУ
НА ФОРМИРОВАНИЕ БЕЗДЕФЕКТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

С использованием математического моделирования и информационных технологий выполнены исследования и установлены закономерности влияния подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений при изготовлении технологических трубопроводов различных типоразмеров.

Основные факторные параметры подготовки и сборки под сварку, несоблюдение которых приводит к образованию специфических дефектов сварных соединений, – нарушение требований подготовки кромок (угол притупления, радиус скругления), несоответствие нормативным размерам зазора между свариваемыми элементами, нарушение соосности, некачественная зачистка (наличие ржавчины, вмятин, сколов, масел) и прихватка. Для подтверждения полученных результатов и установления структур образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений при отрицательных параметрах подготовки и сборки под сварку были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проводили при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде CO_2 , в смеси $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ 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 дефектности и установлено, что отрицательные параметры фактора подготовки и сборки под сварку являются причиной образования присущей только этому фактору структуры дефектности.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка, механизированная сварка в защитных газах, подготовка и сборка под сварку, технологические трубопроводы, сварные соединения, дефектность, причины брака, доминирующие факторы, уровень качества.

P.V. Zankovets

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**REGULARITIES OF WELD PREPARATION AND FIT-UP TECHNOLOGICAL
PROCESS INFLUENCE ON FAULTLESS OF WELDED CONNECTIONS FORMATION**

Joint preparation (root face), overmatched size of the gap, bad fit-up, misalignment, not completed removal of rust, oil and incorrect tack welds are main factorial parameters. Experiments were carried out to confirm theoretical results and to establish schematics of defects, which were formed in production welds when dominated factors were negative.

Research as conducted during construction of technological pipelines of different size with shielded arc welding (SAW), GMAW in CO_2 and $\text{Ar} + \text{CO}_2$ 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. It is concluded that negative factors of joint preparation are the cause of forming of defects structure which is unique, related to this only factor.

Keywords: manual arc welding, mechanized gas-shielded arc welding, weld preparation and fit-up, technological pipelines, welded connections, defectiveness, defects reasons, dominating factors, quality level.

Введение. Анализ современного состояния сварочного производства как в Республике Беларусь, так и во всем мире показывает, что проблема формирования бездефектных сварных соединений в условиях монтажа может быть решена только с учетом множества взаимосвязанных факторов, определяющих сложные технологические процессы заготовительных и сборочно-сварочных работ. Это подготовка и сборка под сварку, квалификация исполнителей, свариваемые, сварочные и вспомогательные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование, способы и условия сварки, сварочный процесс, организация работ, термообработка, дефектоскопический контроль, квалификация ИТР, время года, ритмичность работ и др. Исследования, выполненные

такими известными учеными, как Б. Е. Патон, В. Н. Волченко, В. И. Махненко, И. Каору, В. И. Троицкий, В. А. Черноусов подтверждают, что для успешного решения поставленной задачи необходимо исследовать взаимосвязь и влияние этих факторов на технологические процессы заготовительных и сборочно-сварочных работ и на этой основе обеспечивать бездефектное формирование сварных соединений [1–5].

Методика исследования влияния подготовки и сборки под сварку на формирование сварных соединений. Подготовка и сборка под сварку является одним из доминирующих факторов, который определяет выходной уровень качества сварных соединений. Брак, допущенный по этому фактору, приводит к специфическим дефектам. Установлено, что эти дефекты генерируются основными факторными причинами – это нарушение требований подготовки кромок (угол притупления, радиус скругления), несоответствие нормативным размерам зазора между свариваемыми элементами, нарушение соосности, некачественная зачистка (наличие ржавчины, вмятин, сколов, масел) и прихватка. Большое значение в технологическом процессе сборочно-сварочных работ имеет также типоразмер сварного соединения (диаметр/длина и толщина свариваемого металла). 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.

Согласно формулам дефектности базовой совокупности структура дефектности по причинам определяется следующим образом [2–5, 7, 11, 13]:

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

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.

Выполненные исследования функциональной связи причин с количеством дефектности не выявили [6–9, 12, 14–15]. Однако в результате экспериментальных исследований с использованием информационных технологий (рис. 1) установлена важная статистическая связь структуры образуемой дефектности с ее причинами.

Дата	РГГ или УЭК	Клейно	Кл. 1	Кл. 2	Кл. 3	Пров. стык	Деф. стык	D	S	Пр. шва	Пр. деф.	Причина
08.03.2010	РГГ	М2				62	3	159	5	30954.1	370	Подготовка и сборка
13.03.2010	РГГ	98				5	2	219	6	3438.3	340	Подготовка и сборка
17.03.2010	РГГ	11	С2			8	1	325	6	8164	250	Подготовка и сборка
27.03.2010	УЭК	Ю0	22			27	2	273	36	23144.94	420	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЭК	Э	РР			7	2	720	8	15825.6	1130	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЭК	Э	РР			3	1	630	8	5934.6	495	Подготовка и сборка
17.05.2010	РГГ	99				27	8	720	9	61042	18086	Подготовка и сборка
22.05.2010	РГГ	С				10	2	720	9	22608	4522	Подготовка и сборка
24.05.2010	РГГ	99	С4	ппп		16	14	720	9	36173	31651	Подготовка и сборка
25.05.2010	РГГ	С				14	7	1220	11	53631	26816	Подготовка и сборка
29.05.2010	РГГ	99	ппп			11	7	1220	11	42139	10535	Подготовка и сборка
17.06.2010	РГГ	77				10	4	1220	11	69000	9600	Подготовка и сборка
22.07.2010	УЭК	Т1	Т	В		4	2	640	10	8038	980	Подготовка и сборка
25.07.2010	УЭК	КК	Э			4	2	2220	10	27883	3400	Подготовка и сборка
27.07.2010	УЭК	Т1	Т	Э		4	2	4427	10	55603	6900	Подготовка и сборка
21.08.2010	РГГ	77	шш			15	4	820	9	166200	21300	Подготовка и сборка

Рис. 1. Пример получения статистической информации о дефектности сварных соединений по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку»

Fig. 1. Example of obtaining statistical information on welded connections defectiveness after “fit-up and preparation for welding” factor reasons

Выражение (1) для определения структуры образующейся дефектности по причинам фактора «Подготовка и сборка» можно представить в следующем виде:

$$PC_n = П(X_1) + Ш(X_2) + Н(X_3) + Фш(X_4) + Пр(X_5), \quad (2)$$

где PC_n – структура дефектности по причинам фактора; $n = 1$ – подготовка кромок; $n = 2$ – зазор, соосность; $n = 3$ – прихватка, зачистка; $X_1 - X_5$ – среднее количество конкретных типов дефектов на участке контроля.

Для подтверждения полученных результатов и установления структур образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений при отрицательных параметрах доминирующих производственных факторов были проведены экспериментальные исследования [6, 7, 12, 13, 15]. Исследования проводили при изготовлении сварных соединений технологических трубопроводов различных типоразмеров ручной дуговой сваркой (РДС), механизированной в среде CO_2 , в смеси $CO_2 + Ar$ и аргодуговой сваркой (РАДС). Дефектность определяли по данным неразрушающих методов контроля (НМК) – визуального (ВК), рентгенографического (РГГ) и ультразвукового (УЗК).

Изучение вероятностных связей факторных причин с количеством, размерностью, видом и структурой образующейся дефектности проводили при следующих условиях.

1. В соответствии с требованиями 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» и СТБ ISO 6520-1-2009 «Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов по геометрическим параметрам в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением» экспертно устанавливаем положительными все параметры доминирующих в формировании сварных соединений производственных факторов – «Подготовка и сборка под сварку», «Сварочные материалы», «Сварочное оборудование», «Сварочный процесс».

2. Изготовление сварных соединений выполняют высококвалифицированные, аттестованные на данный способ сварки сварщики.

3. Типоразмеры сварных соединений, марки свариваемых и сварочных материалов, сварочное и вспомогательное оборудование, способы и условия сварки постоянны.

4. При налаженном технологическом процессе изготавливаем партию сварных стыков определенных типоразмеров.

5. Выполняем контроль качества сварных соединений неразрушающими методами в соответствии с назначением и ответственностью свариваемых конструкций. Согласно СТБ ЕН 970-2003, СТБ 1138-98, СТБ ЕН 1435-2004 трубопроводы диаметром до 112 мм представляют один участок контроля ($L = 150 \div 300$ мм), 289 мм – два участка и 500 мм – пять участков.

6. Получаем образцовую партию бездефектных сварных стыков.

7. В соответствии с разработанным алгоритмом последовательно по каждому из доминирующих факторов устанавливаем один отрицательный параметр (при положительных остальных параметрах) с целью выявления связей причины со структурой образующейся дефектности.

8. Изготавливаем экспериментальную партию сварных стыков. Количество сваренных стыков в опытных партиях может быть различным при соблюдении условий пункта 3.

9. Выполняем 100%-й контроль качества сварных соединений неразрушающими методами.

10. Последовательно исследуем связи между образующейся дефектностью и конкретными отрицательными параметрами каждого из доминирующих факторов.

11. По результатам исследований формируем компьютерные базы данных и знаний, представляющие конкретный доминирующий фактор.

12. Исследуем и анализируем с использованием компьютерных технологий, статистических и вероятностных методов образовавшуюся дефектность по видам, размерам, количеству и структуре [7, 10, 11, 14, 15].

13. Определяем вероятность соответствия отрицательных параметров (причин) структуре образующейся дефектности.

14. В соответствии со структурой образующейся дефектности и ее причинами устанавливаем закономерности формирования бездефектных сварных соединений по каждому из доминирующих факторов.

Согласно условиям проведения экспериментальных исследований по фактору «Подготовка и сборка под сварку» последовательно устанавливали отрицательными его основные параметры при положительных остальных. Изготавливали опытную партию стыков при *специально разлаженном технологическом процессе*.

Закономерности формирования сварных соединений при отрицательных параметрах подготовки и сборки под сварку. В табл. 1 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательном параметре «подготовка кромок». Из таблицы видно, что с увеличением диаметров трубопроводов резко возрастает количество непроваров (между слоями и по кромке шва), в то же время количество остальных дефектов меняется незначительно и в принципе не зависит от типоразмеров сварных соединений.

При изготовлении сварных соединений трубопроводов малых диаметров толщина свариваемых металлов, как правило, не превышает 3 мм, поэтому разделки кромок обычно не требуется. Поэтому и частота и количество непроваров в данном случае не показательны. Таким образом, структура дефектности по причине «подготовка кромок» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$ПС_1 = П(1,6) + Ш(1,7) + Н(1,9) + Фш(0,6) + Пр(0,5). \quad (3)$$

Таблица 1. Структура дефектности, выявленная по причине «подготовка кромок» при РДС стыков трубопроводов

Table 1. The structure of defectiveness revealed after the “edge preparation” reason under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	1250	175/14	2190	1,8	2430	1,9	380	0,3	530	0,4	680	0,5
20Х	89	4,0	1270	495/39	2360	1,9	2490	2,0	1790	1,4	520	0,4	690	0,5
14ХГС	112	6,0	2790	1590/57	4150	1,5	4370	1,6	4920	1,8	1280	0,5	1410	0,5
20Х	289	10,0	870	539/62	1230	1,4	1180	1,4	2430	2,8	610	0,7	440	0,5
14ХГС	500	14,0	530	355/67	740	1,4	810	1,5	1670	3,2	430	0,8	220	0,4
Итого			6710	3154/48	10670	1,6	11280	1,7	11190	1,9	3370	0,6	3440	0,5

Выполненными экспериментальными исследованиями установлено, что при отрицательных параметрах «зазор» и «соосность» при сварке стыков трубопроводов образуется практически идентичная структура дефектности. В табл. 2 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательных факторных параметрах «зазор» и «соосность». Видно, что по причинам отрицательных параметров зазора и соосности всего забраковано 62 % опытной партии стыков. Также установлено, что с увеличением диаметров трубопроводов процент брака сварных соединений по этим причинам увеличивается независимо от способа сварки. Так, если при сварке трубопроводов диаметром 57 мм по этим причинам забраковано 32 % стыков, то при сварке трубопроводов диаметром 500 мм забраковано уже 85 % стыков.

Структура дефектности по причинам «зазор» и «соосность» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$ПС_2 = П(1,7) + Ш(1,7) + Н(2,8) + Фш(2,2) + Пр(0,8). \quad (4)$$

В отличие от структуры дефектности, представленной выражением (3), в результате отрицательных факторных параметров «зазор» и «соосность» значительно увеличилось количество не-

Таблица 2. Структура дефектности, выявленная по причинам «зазор» и «соосность» при РДС стыков трубопроводов

Table 2. The structure of defectiveness revealed after the “flashing gap” and “alignment” reasons under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано стыков, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	250	80/32	375	1,5	425	1,7	575	2,3	475	1,9	175	0,7
20Х	89	4,0	260	138/53	490	1,9	510	2	590	2,3	520	2	210	0,8
14ХГС	112	6,0	560	353/63	1020	1,8	1040	1,9	1570	2,8	1180	2,1	390	0,7
20Х	289	10,0	220	165/75	750	1,7	790	1,8	1460	3,3	1110	2,5	790	0,8
14ХГС	500	14,0	260	221/85	2340	1,8	2470	1,9	4420	3,4	3510	2,7	1040	0,8
Итого			1550	957/62	4975	1,7	5235	1,7	8615	2,8	6795	2,2	2605	0,8

проваров – 2,8 на участок контроля, и особенно дефектов формы шва – в 3,7 раза. Однако сама структура дефектов осталась практически неизменной.

Завершающий этап технологического процесса «Подготовка и сборка под сварку» – прихватка и зачистка шва и околошовной зоны. Нарушение нормативных требований по правилам установки прихваток и зачистке также вызывает образование недопустимой дефектности в сварных соединениях. Установлено, что по этим причинам также образуется практически идентичная структура дефектности. Однако следует отметить, что невыполнение требований по установке прихваток часто вызывает другую, уже рассмотренную в работе факторную причину брака – нарушение соосности стыков трубопровода. В табл. 3 представлены результаты исследования сварных соединений стыков трубопроводов ручной дуговой сваркой при отрицательных параметрах «зачистка» и «прихватка». Видно, что по причинам в сравнении с установленными в табл. 2 в структуре дефектности значительно возросла частота и количество пор и шлаковых включений. Также практически в 2 раза увеличилось количество прочих дефектов, среди которых преобладают подрезы, наплывы и кратеры.

Структура дефектности по причинам «прихватка» и «зачистка» при ручной дуговой сварке трубопроводов в данных условиях выглядит следующим образом:

$$PC_3 = П(2,4) + Ш(2,9) + Н(2,1) + Фш(2,4) + Пр(1,6). \quad (5)$$

Таблица 3. Структура дефектности, выявленная по причинам «прихватка» и «зачистка» при РДС стыков трубопроводов

Table 3. The structure of defectiveness revealed after the “tack” and “preweld cleaning” reasons under the pipelines joints manual arc welding conditions

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
09Г2	57	2,5	230	64/28	485	2,1	644	2,8	345	1,5	390	1,7	345	1,5
20Х	89	4,0	310	115/37	715	2,3	837	2,7	560	1,8	710	2,3	500	1,6
14ХГС	112	6,0	420	181/43	1050	2,5	1260	3,0	925	2,2	1050	2,5	670	1,6
20Х	289	10,0	370	211/57	1920	2,6	2220	3,0	1850	2,5	1920	2,6	1260	1,7
14ХГС	500	14,0	340	218/64	4420	2,6	4930	2,9	4420	2,6	4590	2,7	2720	1,6
Итого			1670	789/46	8590	2,4	9891	2,9	8100	2,1	8660	2,4	5495	1,6

Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при ручной дуговой сварке, представлена на рис. 2. Дефекты формы шва формируются, как правило, из-за смещения стыков в результате нарушения технологии постановки прихваток, а также неудовлетворительной зачистки шва и околошовной зоны.

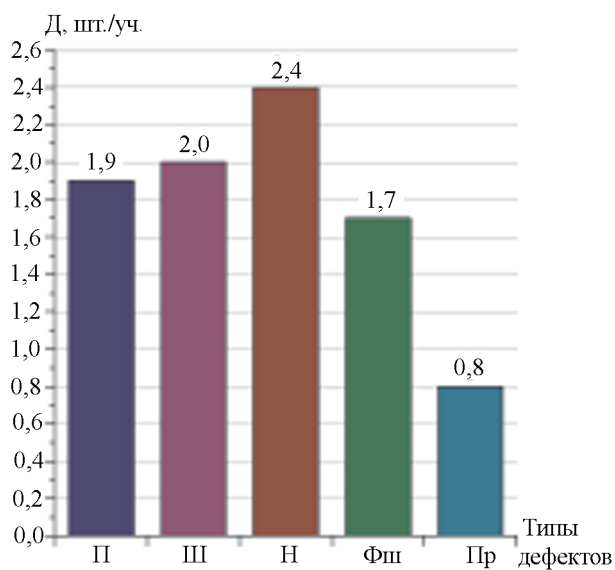


Рис. 2. Пример получения статистической информации о дефектности сварных соединений по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку»

Fig. 2. The structure of defectiveness formed for the reasons of the “fit-up and preparation” factor under the pipelines joints manual arc welding

непровары, а частота и количество пор, шлаковых включений, дефектов формы шва и прочих дефектов незначительны независимо от типоразмеров сварных соединений. Структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений механизированной сваркой в среде защитных газов по причине некачественной подготовки кромок выглядит следующим образом:

$$ПС_1 = П(0,8) + Ш(0,8) + Н(1,7) + Фш(0,5) + Пр(0,7). \quad (6)$$

Т а б л и ц а 4. Структура дефектности, выявленная по причине «подготовка кромок» при механизированной сварке стыков трубопроводов в среде защитных газов

Table 4. The structure of defectiveness revealed after the “edge preparation” reason under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	850	342/40	790	0,9	640	0,8	1180	1,4	410	0,5	530	0,6
09Г2	89	4,0	730	308/42	620	0,8	560	0,8	940	1,3	330	0,5	490	0,7
14ХГС	112	6,0	1180	648/55	860	0,7	930	0,8	1930	1,6	510	0,4	670	0,6
20Х	289	10,0	970	559/58	1560	0,8	1750	0,9	3880	2,0	770	0,4	1350	0,7
14ХГС	500	14,0	480	307/64	2160	0,9	1920	0,8	5760	2,4	1680	0,7	1920	0,8
Итого			4210	2164/52	5990	0,8	5800	0,8	13690	1,7	3700	0,5	4960	0,7

Структура дефектности, полученная при механизированной сварке в защитных газах, позволяет сравнить ее с представленной выражением (3) структурой дефектности, полученной при ручной дуговой сварке при одном и том же отрицательном факторном параметре и идентичных условиях сборочно-сварочных работ. Видно, что количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов практически одинаково. Однако количество пор и шлаковых включений уменьшилось практически в 2 раза, что еще раз подтверждает преимущество механизированных способов сварки над ручной дуговой. В табл. 5 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов при отрицательных факторных параметрах «зазор» и «соосность». Видно, что в структуре образую-

щейся дефектности преобладают непровары – от 2,3 до 3,4, а также различные дефекты формы шва – от 1,5 до 2,5 на участке контроля.

Показательно, что с увеличением диаметров трубопроводов растет и количество этих дефектов. Частота и количество пор, шлаковых включений и прочих дефектов меняются незначительно и практически не зависят от типоразмеров сварных соединений. Этот факт свидетельствует о стабильности технологических процессов формирования сварных соединений, не связанных с исследуемыми факторными параметрами «зазор» и «соосность». Структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений механизированной сваркой в среде защитных газов по причинам «зазор» и «соосность» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов выглядит следующим образом:

$$PC_2 = П(1,3) + Ш(1,4) + Н(2,7) + Фш(1,9) + Пр(1,3). \quad (7)$$

Таблица 5. Структура дефектности, выявленная по причинам «зазор» и «соосность» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов

Table 5. The structure of defectiveness revealed after the “flashing gap” and “alignment” reasons under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	850	440/52	1020	1,2	1105	1,3	1955	2,3	1275	1,5	1020	1,2
09Г2	89	4,0	730	393/54	950	1,3	1095	1,5	1750	2,4	1170	1,6	880	1,2
14ХГС	112	6,0	1180	672/57	1530	1,3	1650	1,4	3070	2,6	2120	1,8	1530	1,3
20Х	289	10,0	970	611/63	2910	1,5	2900	1,5	5820	3,0	4270	2,2	2910	1,5
14ХГС	500	14,0	480	307/67	3360	1,4	3370	1,4	8160	3,4	6000	2,5	3360	1,4
Итого			4210	2423/59	9770	1,3	10120	1,4	20755	2,7	14835	1,9	9700	1,3

В табл. 6 представлены результаты изготовления сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов при отрицательных факторных параметрах «прихватка» и «зачистка». Видно, что в структуре образующейся дефектности в данном случае преобладают поры и шлаковые включения, в среднем по 2,7 на участке контроля. Их количество стабильно высокое и меняется незначительно с увеличением типоразмеров трубопроводов.

Количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов при изготовлении сварных соединений представленных типоразмеров сравнительно невысокое и постоянное. Этот факт подтверждает стабильность технологических процессов сборочно-сварочных работ, не связанных с нарушением нормативных параметров постановки прихватки и зачистки.

Таким образом, структура образующейся дефектности при изготовлении сварных соединений стыков трубопроводов механизированной сваркой в среде защитных газов по причинам отрицательных факторных параметров «прихватка» и «зачистка» выглядит следующим образом:

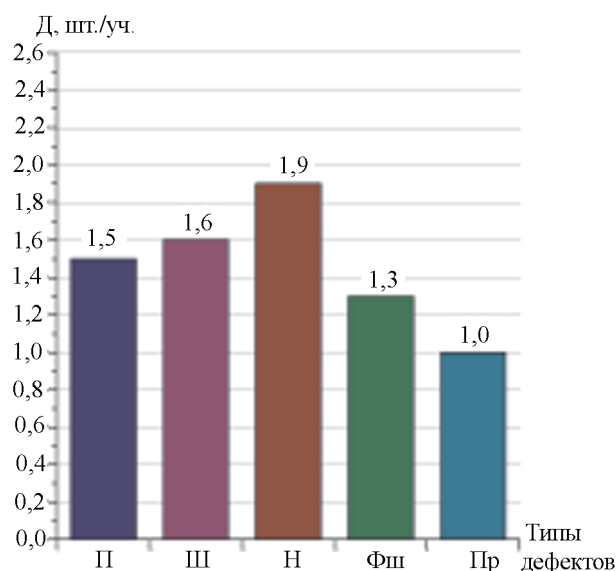


Рис. 3. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» при механизированной сварке

Fig. 3. The general structure of defectiveness, formed for the reasons of the “fit-up and preparation for welding” factor under the mechanized welding

$$PC_3 = П(2,7) + Ш(2,7) + Н(1,7) + Фш(1,9) + Пр(1,3). \quad (8)$$

Диаграмма структуры дефектности, образующейся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при механизированной сварке, представлена на рис. 3.

Таблица 6. Структура дефектности, выявленная по причинам «прихватка» и «зачистка» при механизированной сварке в защитных газах стыков трубопроводов (процесс разлажен)

Table 6. The structure of defectiveness revealed after the “tack” and “pre-weld cleaning” reasons under the mechanized welding of pipelines joints by gas-shielded welding

Марка стали	Диаметр, мм	Толщина, мм	Сварено стыков, шт.	Забраковано, шт./%	Типы дефектов и их количество									
					П		Ш		Н		Фш		Пр	
					всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.	всего	шт./уч.
14ХГС	89	4,0	320	109/34	736	2,3	800	2,5	480	1,5	575	1,8	384	1,2
09Г2	89	4,0	410	143/35	984	2,4	1025	2,5	615	1,5	780	1,9	530	1,3
14ХГС	112	6,0	730	300/41	1900	2,6	1910	2,6	1240	1,7	1315	1,8	876	1,2
20Х	289	10,0	450	202/45	2700	3,0	2790	3,1	1710	1,9	1710	1,9	1170	1,3
14ХГС	500	14,0	270	133/49	4185	3,1	4050	3,0	2430	1,8	2700	2,0	1890	1,4
Итого			2180	887/41	10505	2,7	10575	2,7	6475	1,7	7080	1,9	4850	1,3

По сравнению с ручной дуговой сваркой при изготовлении сварных соединений в аналогичных условиях (структура дефектности представлена выражением (5)) заметно снизилась частота и количество непроваров, дефектов формы шва и прочих дефектов – в среднем на 20 %. Однако частота и количество пор и шлаковых включений на участке контроля практически одинаковы при разных способах сварки. Этот важный факт подтверждает установленную ранее статистическую связь структуры образующейся дефектности с ее причинами. В данном случае главными причинами являются прихватка и зачистка. Таким образом, по структуре образующейся дефектности с высокой долей вероятности определяется не только доминирующий производственный фактор (подготовка и сборка), но и его отрицательные параметры.

Из табл. 6 видно, что в общей структуре преобладают дефекты – поры и их скопления и в такой же степени шлаковые включения – по 2,7 на участке контроля. Этот факт свидетельствует о наличии в сварном шве и околошовной зоне остатков ржавчины, окалины, заусенец, масел и других включений. Большое количество дефектов формы шва – 1,9 на участке контроля, а также непроваров, в основном по кромке и между слоями – 1,7 на участке контроля – вызвано нарушением технологии постановки прихваток.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований технологических процессов формирования сварных соединений подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что каждый отрицательный параметр фактора подготовки и сборки под сварку является причиной только ему присущей структуры образующейся дефект-

Таблица 7. Дефектность, выявленная по причинам фактора «Подготовка и сборка под сварку» при разлаженном технологическом процессе

Table 7. The defectiveness revealed after “fit-up and preparation for welding” factor reasons under disarranged technological process conditions

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

ности. Также установлено, что в общей структуре дефектности по причинам фактора «Подготовка и сборка» преобладают дефекты типа «непровар» – 2,1 на участок контроля, шлаковые включения, поры и их скопления, а также различные дефекты формы шва (табл. 7, рис. 4). Согласно назначению и ответственности данных объектов принят 100%-й объем контроля. В случае, когда стык бракуется, он подлежит повторному контролю неразрушающими методами. Видно, что причины, указанные в табл. 7, генерируют от 82,1 до 94,0 % образующихся дефектов. Так, если при сварке труб малых диаметров дефектность образуется в основном из-за плохой зачистки шва, околошовной зоны и подготовки кромок, то на больших диаметрах она образуется, как правило, из-за несоблюдения нормативных требований по установке необходимого зазора и соосности между свариваемыми элементами.

Полученные данные также 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 (табл. 8).

Таблица 8. Влияние подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений технологических трубопроводов

Table 8. The influence of fit-up and preparation for welding on technological pipelines faultless welded connections formation

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

Заключение. Установлено, что при механизированной сварке в защитных газах по сравнению с ручной дуговой сваркой при изготовлении сварных соединений в одинаковых условиях снизилась в среднем на 20 % частота и количество всех типов дефектов, что еще раз подтверждает преимущество механизированных способов сварки над ручными.

Удельный вес фактора «Подготовка и сборка» в формировании бездефектных сварных соединений последовательно возрастает с увеличением диаметров трубопроводов независимо от способов сварки. Так, при сварке трубопроводов диаметром 57 мм удельный вес фактора составляет 18 %, а при сварке трубопроводов диаметром 500 мм – 34,1 %. Такая закономерность, во-первых, объясняется тем, что с увеличением диаметров трубопроводов увеличивается и толщина стенок, сварка, как правило, осуществляется за несколько проходов, причем каждый слой зачищается и выполняется контроль его качества. Во-вторых, значительно возрастает сложность

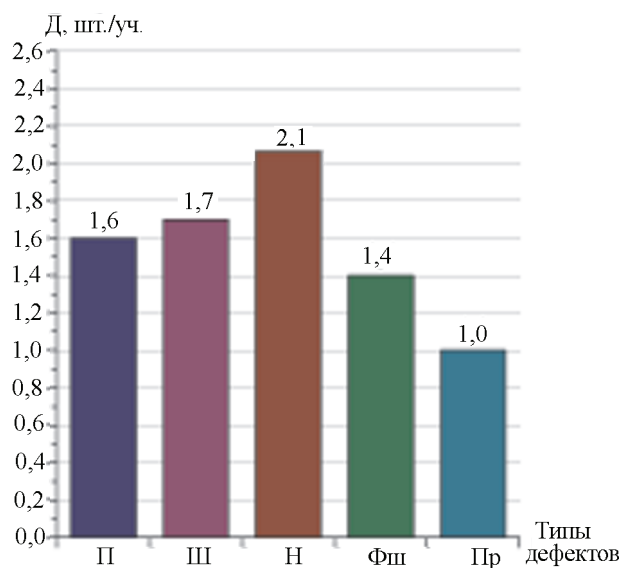


Рис. 4. Общая структура дефектности, образующаяся по причинам фактора «Подготовка и сборка» при сварке стыков трубопроводов

Fig. 4. The general structure of defectiveness, formed for the reasons of the “fit-up and preparation” factor under the pipelines joints welding

соблюдения нормативных требований по установке зазора и соосности. Так, при изготовлении сварных соединений магистральных трубопроводов диаметром более 1220 мм трудоемкость подготовки и сборки под сварку составляет, по разным оценкам, от 65 до 75 % всего технологического процесса. В результате экспериментальных исследований технологических процессов формирования сварных соединений подтверждены ранее полученные данные статистического анализа дефектности и установлено, что отрицательные параметры фактора подготовки и сборки под сварку являются причиной образования присущей только этому фактору структуры дефектности.

Таким образом, определены причинно-следственные связи и закономерности формирования бездефектных сварных соединений по фактору «Подготовка и сборка под сварку», позволяющие принимать обоснованные управляющие решения по предупреждению образования дефектности и совершенствованию технологических процессов сборочно-сварочных работ.

Список использованных источников

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: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2004. – С. 95–98.
2. Совершенствование технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец [и др.]. – Минск: Право и экономика, 2004. – 343 с.
3. Занковец, П. В. Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений / П. В. Занковец, Г. Н. Здор, В. К. Шелег // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 2. – С. 107–113.
4. Занковец, П. В. Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций / П. В. Занковец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 2. – С. 120–128.
5. 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: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2009. – С. 17–22.
6. Занковец, П. В. Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 4. – С. 24–27.
7. Занковец, П. В. Исследование влияния подготовки и сборки под сварку на уровень качества сварных соединений технологических трубопроводов / П. В. Занковец // Автоматическая сварка. – 2011. – № 6. – С. 48–53.
8. Занковец, П. В. Основы формирования бездефектных сварных соединений в условиях мелкосерийного и единичного сборочно-сварочного производства / П. В. Занковец // Сварка и родственные технологии : сб. докладов Междунар. симп. – Минск, 2012. – С. 49–54.
9. Занковец, П. В. Информационно-аналитические системы в обеспечении качества сварочных работ / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение : сб. докл. III межотрасл. науч.-практ. конф. – Минск, 2016. – С. 143–149.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Занковец, П. В. Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 5–15.
15. Занковец, П. В. Исследование закономерностей образования дефектности сварных соединений в условиях единичного и мелкосерийного сварочного производства / П. В. Занковец // Порошковая металлургия. – 2016. – № 39. – С. 129–141.

References

1. Zankovets P.V., Sheleg V.K. Mathematical simulation of production factors influence on defects formation in welded connections. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v svarke i rodstvennykh protsessakh : sbornik trudov 2-i Mezhdunarodnoi konferentsii* [Mathematical simulation and information technologies in welding and related processes, Collected papers of 2nd International Conference]. Kiev, Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004, pp. 95–98. (In Russian).

2. Zankovets P.V., Sheleg V.K., Denisov L.S., Berbasova N.Yu., Pavlyuk S.K. *Upgrading of the technological processes and quality optimisation in assembly welding works*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2004. 343 p. (In Russian).
3. Zankovets P.V., Zdor G.N., Sheleg V.K. Working out the methods and investigating the reasons of welded connections unsoundness. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2006, no. 2, pp. 107–113. (In Russian).
4. Zankovets P.V. Mathematical simulation and information technologies in quality assurance for welded assemblies. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2007, no. 2, pp. 120–128. (In Russian).
5. Zankovets P.V. Quality and competitiveness optimization for welding production on the basis of mathematical simulation for cause-and-effect relations in formation of defects of welded connections. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v svarka i rodstvennykh protsessakh : sbornik trudov 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii* [Mathematical simulation and information technologies in welding and related processes: collected papers of 4th International Conference]. Kiev, Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009, pp. 17–22. (In Russian).
6. Zankovets P.V. Use of mathematical simulation for investigating the influence of welding materials on quality of the pipelines welded connections. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika* [Pipeline Transport: Theory and Practices], 2010, no. 4, pp. 24–27. (In Russian).
7. Zankovets P.V. Investigating the influence of preparation and assemblage for welding on a quality level of technological pipelines welded connections. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding], 2011, no. 6, pp. 48–53. (In Russian).
8. Zankovets P.V. Fundamental of faultless welded connections formation in the conditions of small-scale and individual assembly welding production. *Svarka i rodstvennye tekhnologii : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Welding and related technologies: the collection of reports of the International Symposium], Minsk, 2012, pp. 49–54. (In Russian).
9. Zankovets P.V. Information and analytical systems in quality insurance for welding works. *Effektivnaya svarka: kachestvo, bezopasnost', resursoberezhenie : sbornik dokladov III mezhotraslevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Effective welding: quality, safety, resource-saving: Proceedings of IIIrd Interindustry Scientifically-Practical Conference]. Minsk, 2016, pp. 143–149. (In Russian).
10. Zankovets P.V. Investigating the influence of dominating production factors on the welded connections quality. *Inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Engineering of the surfaces, new composite powder materials, welding: collection of the International symposium reports], Minsk, 2009, pp. 297–304. (In Russian).
11. Zankovets P.V. Investigating the influence of dominating production factors on the welded connections quality. *Inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka : sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Engineering of the surfaces, new composite powder materials, welding: collection of the International symposium reports], Minsk, 2009, pp. 65–66. (In Russian).
12. Zankovets P.V. Welding and welded connections quality management after “Defect – Reason – Factor” algorithm. *Effektivnaya svarka: kachestvo, bezopasnost', resursoberezhenie : sbornik dokladov respublikanskoi konferentsii-seminara* [Effective welding: quality, safety, resource-saving: the collection of the Republican conference-seminar reports], Minsk, 2014, pp. 51–57. (In Russian).
13. Fomikhina I.V., Zankovets P.V., Lisovskaya Yu.O. Investigating the influence of welding modes and welded connections defectiveness in vessels for mineral oil and petroleum storage, being under pressure, upon propensity to strain ageing. *Svarka i rodstvennye tekhnologii* [Welding and Allied Technologies], 2008, no. 10, pp. 112–116. (In Russian).
14. Zankovets P.V., Sheleg V.K. Mathematical simulation and automation of process engineering for welded structure production *Nauka i tekhnika* [Science and Technique], 2017, vol. 16, no. 1, pp. 5–15. Doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15. (In Russian).
15. Zankovets P.V. Investigating the laws of defectiveness formation in welded connections under the conditions of individual and small-scale welding fabrication. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder Metallurgy], 2016, no. 39, pp. 129–141. (In Russian).

Информация об авторе

Занковец Павел Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: p.zankovets@mail.ru

Information on author

Zankovets Pavel Vasilievich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: p.zankovets@mail.ru

Для цитирования

Занковец, П. В. Закономерности влияния технологического процесса подготовки и сборки под сварку на формирование бездефектных сварных соединений / П. В. Занковец // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 59–69.

For citing

Zankovets P.V. Regularities of weld preparation and fit-up technological process influence on faultless of welded connections formation. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 59–60. (In Russian).