

УДК 621.791.019

Гаевский В.О., Прохоренко В.М.

Национальный технический университет Украины «КПИ». Украина, Киев

РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ОБЪЁМА ВЫБОРКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОРИСТОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ

Основываясь на методике анализа видов и последствий потенциальных отказов производственного процесса, путем корреляционного анализа табличных данных, применяемых при расчете приоритетного числа рисков, выведена формула для расчета минимально необходимого объема выборки для контроля пористости. Определены условия, при которых допустимо не контролировать пористость сварных швов, уместен выборочный контроль, обязателен 100% контроль пористости сварных швов.

Ключевые слова: риски; пористость; объём выборки; сварные швы; контроль пористости.

Введение

При контроле пористости, в зависимости от нормативных требований и условий эксплуатации изделия, проверяют от 100% до 10% сварных швов. При выборочном контроле пористости, проверяемые единичные участки равномерно распределяют вдоль сварных швов, а фактический объём контроля определяют, руководствуясь допустимым диапазоном объёма контроля, установленным нормативной документацией. В настоящее время отсутствуют чёткие критерии или расчётные модели для однозначного определения необходимого объёма выборки. Превышение реально необходимого объёма выборки неоправданно увеличивает затраты времени и материалов на контроль пористости сварных швов. Назначение минимально допустимого нормативными документами объёма выборки может приводить к не обнаружению дефектов пористости и, как следствие, ограничению или потере функциональности сварного изделия.

Постановка задачи

В сложившейся ситуации оптимизация объёмов выборки для контроля пористости сварных швов требует комплексного анализа возможных последствий не обнаружения недопустимой пористости, а также необходимости расчета вероятности возникновения недопустимой пористости и оценки возможности ее выявления при выборочном контроле.

Основная часть

В основу предлагаемого нами метода расчета оптимального объема выборки положена базовая

методика анализа видов и последствий потенциальных отказов производственного процесса [1–4]. В базовой методике ограничивают уровень рисков, связанных с отказами производственных процессов. Недопустимая пористость сварных швов – это один из возможных отказов процесса сварки. В применении к процессу сварки риск, связанный с недопустимой пористостью сварных швов, может быть определён в балльной шкале по зависимости

$$RPN = S \times O \times D, \quad (1)$$

где RPN – приоритетное число рисков, баллы; S – ранг значимости последствий недопустимой пористости сварного шва, баллы; O – ранг возможности (вероятности) невыполнения требований к пористости сварного шва, баллы; D – ранг обнаружения недопустимой пористости сварного шва, баллы.

В общем случае значения рангов находятся в диапазоне от 1 до 10 и определяются по справочным таблицам [3], которые должны быть адаптированы к отраслевой специфике производственного процесса. Приоритетное число рисков принимает значения из диапазона 1...1000 баллов, комплексно учитывая значимость последствий отказа производственного процесса, вероятность отказа производственного процесса, вероятность своевременного обнаружения отказа или его причин. Риски ограничивают постановкой целевых (предельно допустимых) значений приоритетного числа рисков RPN^0 . Считают, что риски приемлемы при выполнении условия

$$RPN \leq RPN^0 = 100. \quad (2)$$

Выполнение выборочного контроля пористости с объёмом выборки Q , определяемого как отношение суммарной длины проконтролированных единичных участков к общей длине сварных швов в изделии, приводит к возможности не обнаружения дефектных единичных участков с вероятностью не обнаружения дефекта

$$P_{\bar{A}} = 1 - Q. \quad (3)$$

По вероятности не обнаружения дефекта $P_{\bar{D}}$ табличным методом определяют значение ранга обнаружения D (табл. 1).

Корреляционный анализ приведенных табличных данных показывает (рис. 1), что вероятность не обнаружения дефекта $P_{\bar{D}}$ связана с рангом обнаружения D экспоненциальной зависимостью с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,974$.

Значение ранга вероятности невыполнения требований O определяют по вероятности невыполнения требований $P_{\bar{n}/c}$ табличным методом (табл. 2).

Корреляционный анализ табличных данных (рис. 2) показывает, что вероятность невыполнения требований $P_{\bar{n}/c}$ и ее ранг O связаны между собой степенной зависимостью с коэффициентом корреляции $R^2=0,982$.

Таким образом, применительно к процессам сварки вероятность невыполнения требований к пористости сварных швов $P_{\bar{n}/c}^{\text{нор}}$ и ее ранг O связаны зависимостью

$$P_{\bar{D}}^{\text{нор}} = 10^{-4} \exp(0,733 \cdot D), \quad (6)$$

откуда

$$O = (2 \cdot 10^4 \cdot P_{\bar{n}/c}^{\text{нор}})^{8,548^{-1}}. \quad (7)$$

Таблица 1.

Ранг вероятности невыполнения требований D [3]

D , баллы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\bar{D}}$ доли	0,0001	0,0007	0,0014	0,0022	0,0030	0,0098	0,0166	0,04	0,08	0,12

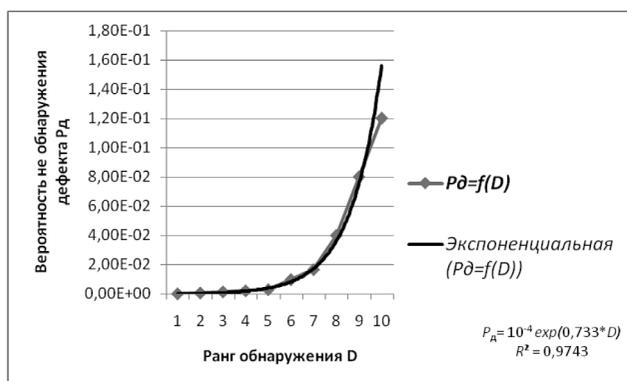


Рис. 1. Зависимость вероятности не обнаружения дефекта $P_{\bar{D}}$ от ранга обнаружения D

Таким образом, применительно к процессам сварки, вероятность не обнаружения дефектного участка сварного шва $P_{\bar{D}}^{\text{нор}}$ и ранг обнаружения D связаны зависимостью

$$P_{\bar{D}}^{\text{нор}} = 10^{-4} \exp(0,733 \cdot D), \quad (4)$$

откуда

$$D = \frac{1}{0,733} \cdot \ln(10^{-4} \cdot P_{\bar{D}}^{\text{нор}}), \quad (5)$$

Подстановка в формулу (1) значений O ранга вероятности невыполнения требований к пористости сварного шва (7) и значений D ранга обнаружения единичного участка с недопустимой пористостью сварного шва (5) позволяет рассчитать максимально допустимую вероятность $P_{\bar{D}}^{\text{нор}}$ не обнаружения дефектного участка сварного шва, обеспечивающую приемлемый уровень рисков ($RPN \leq RPN^0$)

$$P_{\bar{D}}^{\text{нор}} = 10^{-4} \cdot \exp[0,733 \cdot PRN^0 \cdot S^{-1} \cdot (2 \cdot 10^4 \mp P_{\bar{n}/c}^{\text{нор}})^{8,548}]. \quad (8)$$

При контроле пористости сварных швов минимально необходимый для достижения приемлемого уровня рисков объём выборки Q_{\min} с учётом выражения (3) может быть найдена по зависимости

$$Q_{\min} = 1 - 10^{-4} \cdot \exp[0,733 \cdot PRN^0 \cdot S^{-1} \cdot (2 \cdot 10^4 \mp P_{\bar{n}/c}^{\text{нор}})^{8,548}]. \quad (9)$$

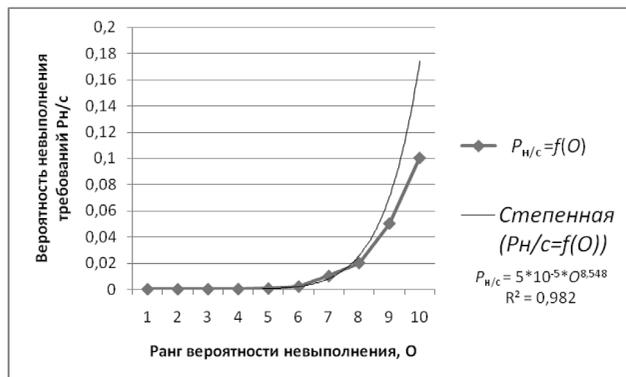
Если расчет минимального объёма выборки Q_{\min} по формуле (9) даёт отрицательное значение, то минимально необходимый объём выборки составляет 0% и в этом случае контролировать сварные швы на пористость не требуется. При этом риски не превысят приемлемый целевой уровень RPN^0 .

Если расчет минимального объёма выборки Q_{\min} по формуле (9) даёт значение, превышающее 99%,

Таблица 2.

Ранг вероятности невыполнения требований O [3]

O , баллы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{н/с}$, доли	10^{-10}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	0,002	0,01	0,02	0,05	0,10

Рис. 2. Зависимость вероятности $P_{н/с}$ невыполнения требований от ранга вероятности невыполнения требований O

то требуется 100% контроль сварных швов на пористость.

Если расчет минимального объема выборки Q_{min} по формуле (9) даёт значение в диапазоне от 0% до 99%, то допустим выборочный контроль с объемом выборки, не меньше расчетного значения. Результаты расчетов по формуле (9) приведены в табл. 3.

В общем случае ранг значимости последствий появления дефекта S необходимо определять по табл. 4

Для адаптации общих подходов табл. 4 к возможным последствиям невыполнения требований по пористости сварных швов следует учитывать влияние пор на служебные свойства сварных соединений и особенности эксплуатации сварных изделий.

Превышение допустимых норм по размерам, количеству и виду пор в сварном шве может повлиять на плотность и механические характеристики сварного соединения. Влияние пор на механические характеристики связано с ослаблением поперечного сечения сварного шва и влиянием пор как концентраторов напряжений в сварном шве.

Известно, что влияние пор на механические характеристики в поперечных (лобовых), по отношению к действующей нагрузке, швах существенно, чем в продольных (фланговых), особенно при низких рабочих напряжениях.

Так же известно, что при статических нагрузках пористость, уменьшающая сечение сварного шва не более чем на 5%, не оказывает существенного вли-

Минимальный объем выборки Q_{min} в %, обеспечивающий $RPN \leq RPN^0 = 100$

Таблица 3.

$P_{н/с}$, доли	Минимальный объем выборки Q_{min} , %									
	S=10	S=9	S=8	S=7	S=6	S=5	S=4	S=3	S=2	S=1
0,001	98	97	93	84	45	0	0	0	0	0
0,01	100	100	98	97	93	73	0	0	0	0
0,02	100	100	100	98	96	86	11	0	0	0
0,03	100	100	100	99	97	90	42	0	0	0
0,04	100	100	100	99	97	92	56	0	0	0
0,05	100	100	100	99	98	93	65	0	0	0
0,06	100	100	100	100	98	94	70	0	0	0
0,07	100	100	100	100	98	95	74	0	0	0
0,08	100	100	100	100	98	95	77	0	0	0
0,09	100	100	100	100	98	96	80	0	0	0
0,1	100	100	100	100	99	96	81	0	0	0
0,2	100	100	100	100	99	97	90	0	0	0



Р _{пор} и/с, доли	Минимальный объем выборки Q _{min} , %									
	S=10	S=9	S=8	S=7	S=6	S=5	S=4	S=3	S=2	S=1
0,3	100	100	100	100	100	98	93	32	0	0
0,4	100	100	100	100	100	98	94	49	0	0
0,5	100	100	100	100	100	99	95	59	0	0
0,6	100	100	100	100	100	99	96	66	0	0
0,7	100	100	100	100	100	99	96	70	0	0
0,8	100	100	100	100	100	99	96	74	0	0
0,9	100	100	100	100	100	99	97	76	0	0
1	100	100	100	100	100	100	97	79	0	0

*Цветом выделены области допустимого выборочного контроля.

Таблица 4.

Ранг значимости последствий появления дефекта S [3]

Критерии назначения ранга	S, баллы
Появление дефекта является потенциальной угрозой для жизни и здоровья людей без предупреждения	10
Появление дефекта является потенциальной угрозой для жизни и здоровья людей с предупреждением	9
Потеря основной функции	8
Снижение основной функции	7
Потеря вторичной функции	6
Снижение вторичной функции	5
Потеря внешнего вида, неудобство, дополнительное техническое обслуживание, замечают 75% потребителей	4
Потеря внешнего вида, неудобство, дополнительное техническое обслуживание, замечают 50% потребителей	3
Потеря внешнего вида, неудобство, дополнительное техническое обслуживание, замечают 25% потребителей	2
Никаких заметных последствий	1

яния на предел текучести, относительное удлинение и угол загиба. Дальнейшее ослабление сварного шва вследствие появления пор приводит к значительному ухудшению механических свойств сварного соединения. Значимость влияния пор на механические свойства зависит от свойств основного металла (высокопрочные стали больше подвержены влиянию пор, чем низкоуглеродистые), типа сварного соединения (стыковые и, особенно, нахлесточные сварные соединения, менее подвержены влиянию пор, чем угловые и тавровые), глубины залегания пор (даже мелкие, залегающие у

поверхности поры, вызывают надрывы при статическом изгибе). При переменных нагрузках следует учитывать влияние пор как концентраторов напряжений. Поры, имеющие суммарную площадь в поперечном сечении сварного шва всего 0,8%, снижают сопротивление усталости сварного соединения на 20%, дальнейшее увеличение пористости может снизить сопротивление усталости сварного соединения на 60%. Плотность (герметичность) сварного соединения нарушают поры, выходящие на поверхность металла (свищи), они же являются и очагами коррозии сварного соединения.

Технологические нормы допустимой пористости определяют отдельно для каждого сварного соединения с учётом его значимых, с точки зрения влияния пор, особенностей. При этом учитывают предна-

значение и условия эксплуатации сварного изделия в целом. Этот подход нами сохранён при определении ранга возможных последствий превышения технологических норм допустимой пористости (табл. 5).

Таблица 5.

Ранг значимости возможных последствий недопустимой пористости сварного шва

Критерии назначения ранга	S, баллы
Превышение допустимой пористости является потенциальной угрозой для жизни и здоровья людей без предупреждения, то есть разрушение или потеря герметичности изделия происходят одномоментно. Например, рабочие сварные швы, находящиеся под действие переменных нагрузок сосудов, работающих под высоким давлением, трубопроводов, ёмкостей для хранения опасных жидкостей и газов, несущих строительных конструкций, изготовленных из высокопрочных сталей	10
Превышение допустимой пористости является потенциальной угрозой для жизни и здоровья людей с предупреждением, то есть разрушению или потере герметичности изделия предшествуют изменения формы, цвета, звуки, протекания, на которые можно отреагировать. Например, рабочие сварные швы, находящиеся под действием, в основном, постоянных нагрузок в сосудах, работающих под давлением, трубопроводах, ёмкостях для хранения опасных жидкостей и газов, несущих строительных конструкциях, изготовленных из сталей общего назначения	9
Превышение допустимой пористости приводит к потере герметичности или разрушению сварного изделия без угрозы для жизни людей. Например, рабочие сварные швы, находящиеся под действием переменных нагрузок в деталях машин и аппаратов, сосудах, трубопроводах, ёмкостях для хранения неопасных жидкостей и газов, не несущих строительных конструкциях, изготовленных из высокопрочных сталей	8
Превышение допустимой пористости приводит в ходе эксплуатации к незначительному нарушению герметичности или нарушению формы сварного изделия без угрозы для жизни людей. Например, рабочие сварные швы, находящиеся под действие постоянных нагрузок в деталях машин и аппаратов, сосудах, трубопроводах, ёмкостях для хранения неопасных жидкостей и газов, не несущих строительных конструкциях, изготовленных из сталей общего назначения, корпусах судов	7
Сварное изделие, являясь компонентом сложной технической системы, не связано напрямую с обеспечением её основных функций. Превышение допустимой пористости приводит к разрушению или потере герметичности сварного шва, что не отражается на работоспособности изделия в целом, но требует обязательного ремонта. Например, рабочие сварные швы корпусных транспортных конструкций, находящиеся под действием переменных нагрузок – борта вагонов, кузова автомобилей	6
Сварное изделие, являясь компонентом сложной технической системы, не связано напрямую с обеспечением её основных функций. Превышение допустимой пористости приводит к нарушению формы или снижению герметичности сварного шва, что не отражается на работоспособности изделия в целом, но может потребовать его ремонта. Например, сварные швы корпусов машин и аппаратов	5



Критерии назначения ранга	S, баллы
Превышение допустимой пористости приводит к ухудшению внешнего вида, неудобству, необходимости дополнительного технического обслуживания (шпаклёвка, покраска), на что обращают внимание до 75% потребителей. Например, нерабочие (соединительные, связующие) продольные по отношению к нагрузке (фланговые) сварные швы.	4
Превышение допустимой пористости приводит к ухудшению внешнего вида, неудобству, необходимости дополнительного технического обслуживания (шпаклёвка, покраска), на что обращают внимание до 50% потребителей. Например, нерабочие (соединительные, связующие) продольные по отношению к нагрузке (фланговые) сварные швы.	3
Превышение допустимой пористости приводит к ухудшению внешнего вида, неудобству, необходимости дополнительного технического обслуживания (шпаклёвка, покраска) на что обращают внимание до 25% потребителей. Например, нерабочие (соединительные, связующие) продольные по отношению к нагрузке (фланговые) сварные швы.	2
Превышение допустимой пористости не приводит к заметным последствиям	1

Для определения минимально необходимого для контроля пористости сварных швов объёма выборки следует, исходя из особенностей сварного шва, с учётом условий эксплуатации сварного изделия, по табл. 5 определить S – ранг значимости последствий недопустимой пористости сварного шва. По заданному уровню вероятности невыполнения требований к пористости для единичного участка сварного шва $P_{н/с}^{пор}$ и целевому (предельно допустимому) значению приоритетного числа рисков RPN^0 по формуле (9) рассчитать минимально необходимый для достижения приемлемого уровня рисков объём выборки Q_{min} .

Выводы

1. Для достижения приемлемого уровня технологических рисков, связанных с недопустимой пористостью сварных швов $RPN \leq RPN^0$, на основе результатов корреляционного анализа табличных данных, применяемых при расчёте приоритетного числа рисков RPN , выведена зависимость минимально необходимого для контроля пористости объёма выборки Q_{min} от вероятности невыполнения требований к пористости для единичного участка сварного шва $P_{н/с}^{пор}$, учитывающая S – значимость возможных последствий недопустимой пористости сварного шва.

2. Выполнена адаптация общепринятых подходов к определению табличным и расчётным методом ранга обнаружения недопустимой пористости сварного шва, ранга вероятности невыполнения

требований к пористости сварного шва, ранга значимости последствий недопустимой пористости сварного шва. Это даёт возможность на этапе разработки технологии сварки и в ходе оперативного управления процессами сварки применять методику анализа возможностей и последствий отказа производственного процесса для ограничения рисков невыполнения требований к пористости сварных швов.

3. Расчёт минимально необходимого для контроля пористости сварных швов объёма выборки показывает, что при характерных для процессов сварки уровнях дефектности в 1...8% выборочный контроль пористости уместен только для сварных швов с рангом возможных последствий невыполнения требований к пористости $S=4$ балла. К этой категории относятся сварные швы, для которых превышение допустимой пористости приводит к ухудшению внешнего вида, неудобству, необходимости дополнительного технического обслуживания (шпаклёвка, покраска), на что обращают внимание до 75% потребителей, например, нерабочие (соединительные, связующие) продольные по отношению к нагрузке (фланговые) сварные швы. Для более ответственных сварных швов (ранг значимости возможных последствий недопустимой пористости сварного шва $S=10...5$ баллов) фактически требуется 100% контроль пористости, для менее ответственных сварных швов ($S=3...1$ балл) можно не контролировать их пористость, ограничившись контролем соблюдения технологической дисциплины и визуальным осмотром сварных швов.

Символьные обозначения, индексы

RPN – приоритетное число рисков
 RPN^0 – целевое уровень приоритетное число рисков
 S – ранг значимости последствий недопустимой пористости сварного шва
 O – ранг возможности (вероятности) невыполнения требований к пористости сварного шва
 D – ранг обнаружения недопустимой пористости сварного шва
 Q – объём выборки
 Q_{min} – минимальный объём выборки
 P_d – вероятность не обнаружения дефекта
 $P_{пор_d}$ – вероятность не обнаружения дефектного участка сварного шва
 R_2 – коэффициент корреляции
 $P_{н/с}$ – вероятность невыполнения требований
 $P_{н/с}^{пор}$ – вероятность невыполнения требований к пористости сварных швов

Литература

- [1] Shackleton, D. N.: Applying a risk assessment approach to fabrication processes. IIW Regional Conference, Tehran/Iran, March 2002
- [2] ГОСТ Р 51901.12-2007 Метод анализа видов и последствий отказов
- [3] Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA. Ссылочное руководство. Пер. с англ. 4-го изд. от июня 2008 г. – Н.Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2009. – 148 с.
- [4] Шеклтон Д., Уменьшение опасности разрушения сварных конструкций // <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/blog/?year=2008-09&docId=457>
- [5] Волченко В. Н. Статистические методы управления качеством по результатам неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.

Gaevskiy V.O., Prokhorenko V.M.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

CALCULATION MINIMUM NECESSARY SAMPLE SIZE FOR CONTROL OF POROSITY OF THE WELD-FABRICATED GUY-SUTURES

Based on the method of analysis of kinds and consequences of potential refuses of production process, by the cross-correlation analysis of tabular data, applied at the calculation of priority number of risks, a formula is shown out for a calculation minimum necessary sample size for control of porosity. Terms at which it is possible not to control porosity of the weld-fabricated guy-sutures are certain, a sampling test is appropriate, 100% is obligatory control of porosity of the weld-fabricated guy-sutures.

Keywords: risks, porosity, sample size, weld-fabricated guy-sutures, control of porosity.

References

- [1] Shackleton, D. N.: Applying and risk assessment approach to fabrication processes. IIW Regional Conference, Tehran/Iran, March 2002.
- [2] GOST R 51901.12-2007 Method of analysis of kinds and consequences of refuses. (In Russian)
- [3] Analysis of kinds and consequences of potential refuses. FMEA. Reference guidance. – N. Novgorod: of LTD. of SMTS «Priority», 2009. – 148 p. (In Russian)
- [4] Sheklton D. N., Diminishing of risk of breakage of weldments // <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/blog/?year=2008-09&docId=457>. (In Russian)
- [5] Volchenko V. N. Statistics methods of quality management on results non-destructive control. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 64 p. (In Russian)