

Введение

Инженеру-кораблестроителю в своей практической деятельности приходится решать множество вопросов, в том числе касающихся предупреждения сварочных деформаций и устранения их последствий. Решение этих вопросов возможно только на основе прочных знаний основ теории сварочных деформаций и напряжений и технологии судостроения. Однако владение только теоретическими методами решения тех или иных задач не является достаточным признаком хорошего специалиста. Хороший инженер должен уметь выполнять расчёты сварочных деформаций, разрабатывать мероприятия по их уменьшению и предотвращению, учитывать результаты расчётов при проектировании и конструировании изделий, разработке технологии сварки. Исходя из этого, основной целью практикума является закрепление теоретического (лекционного) материала и получение студентами практических навыков расчёта сварочных деформаций в судовых конструкциях.

Практикум разработан на основе руководящих технических материалов (РТМ) РС-707-67 «Методика определения сварочных деформаций и мероприятия по борьбе с ними». В нём в основном приняты условные обозначения и терминология РТМ РС-707-67.

С учётом специфики подготовки специалистов во ВГУВТ расчётные формулы и значения исходных величин приняты только для определения деформаций судовых конструкций, выполненных из стали и алюминиево-магниевых сплавов применительно к корпусам судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Кроме того, многочисленные графики, используемые в РТМ, заменены соответствующими таблицами.

Материал практикума структурирован по двум частям: теоретическая, включающая общие сведения о методах расчёта сварочных деформаций, и расчётная. Последняя, в свою очередь, структурирована по пяти расчётно-графическим работам и охватывает тематику от расчёта деформаций простых конструкций – сварных тавровых балок – до расчёта деформаций сложных объёмных секций.

Принятая в практикуме система изложения материала направлена на упрощение процесса восприятия информации. Особое внимание уделено возможности самостоятельного выполнения студен-

тами расчётно-графических работ. С этой целью в материал по каждой работе включена минимально необходимая для расчёта (в рамках рассматриваемого вопроса) исходная информация. Кроме того, приведена поэтапная последовательность выполнения работы и требования к её оформлению. В конце описания выполнения каждой работы приведён пример её выполнения.

Практикум разработан в соответствии с требованиями рабочих программ дисциплины «Сварка судовых конструкций» и определения задач профессиональной деятельности выпускников по направлениям подготовки 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» и 26.05.01 «Проектирование и постройка кораблей, судов и объектов океанотехники».

Помимо обучения студентов в рамках учебных планов по направлениям подготовки 26.03.02 и 26.05.01 отдельные части практикума могут быть использованы технологами судостроительных и судоремонтных предприятий.

Условные обозначения

L	– длина конструкции, см;
B	– ширина конструкции, см;
H	– высота конструкции, см;
s	– толщина свариваемых деталей, см;
F	– площадь сечения конструкции (детали), см ² ;
I	– момент инерции площади сечения, см ⁴ ;
σ_T	– предел текучести, МПа;
E	– модуль нормальной упругости, МПа;
μ	– коэффициент Пуассона;
$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}$	– относительная деформация, соответствующая пределу текучести свариваемых элементов;
C	– кривизна, 1/см;
k	– катет углового шва, см;
$I_{св}$	– сила сварочного тока, А;
U_d	– напряжение на дуге, В;
$v_{св}$	– скорость сварки, см/с;
η	– эффективный КПД процесса нагрева конструкции сварочной дугой;
$q_{п}$	– погонная энергия нагрева свариваемых элементов, кал/см (Дж/см);
W	– объём поперечного укорочения сварного соединения, см ³ ;
V	– объём продольного укорочения сварного соединения, см ³ ;
w	– объём поперечного укорочения, приходящийся на единицу длины шва, см ² ;
v	– объём продольного укорочения, приходящийся на единицу длины шва, см ² ;
$\Delta L, \Delta B$	– продольные и поперечные укорочения конструкции по оси, проходящей через центр тяжести сечения конструкции, см;
φ_L, φ_B	– угол поворота одного конца конструкции относительно другого, рад;
S_i	– горизонтальное смещение точек сечения конструкции («+» к середине конструкции, «-» от середины конструкции), см;

- f_i – вертикальное смещение точек сечения конструкции («+» вверх, «-» вниз), см;
- β – угловая деформация, рад;
- f – стрелка прогиба, см;
- Θ – коэффициент пропорциональности между погонной энергией нагрева свариваемых элементов и площадью поперечного сечения наплавленного металла шва, Дж/см³;
- ξ – коэффициент, характеризующий склонность материала к сварочным деформациям, см³/Дж;
- α – коэффициент линейного расширения, 1/рад;
- c – удельная теплоёмкость, Дж/г·град;
- ρ – плотность, г/см³.

ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ И ПОРЯДКЕ РАСЧЁТА СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

1.1. Виды сварочных деформаций судовых конструкций и причины их образования

1.1.1. Основной причиной образования сварочных деформаций является неравномерный нагрев изделия во время сварки, который приводит к появлению **необратимых пластических деформаций сжатия** и, следовательно, к укорочению волокон металла в продольном и поперечном направлениях относительно линии прогрева шва¹⁾. Укорочения сварных соединений вызывают **общие и местные сварочные деформации** конструкций.

1.1.2. Общие деформации – это укорочения и изгиб всей конструкции в продольном и поперечном направлениях (рис. 1.1). Эти деформации характеризуются: стрелками прогиба f (см); горизонтальными и вертикальными смещениями точек сечения конструкции S_i и f_i (см); углами поворота одного конца конструкции относительно другого φ_L и φ_B (рад); продольным и поперечным укорочениями конструкции по оси, проходящей через центр тяжести сечений конструкции, ΔL и ΔB (см).

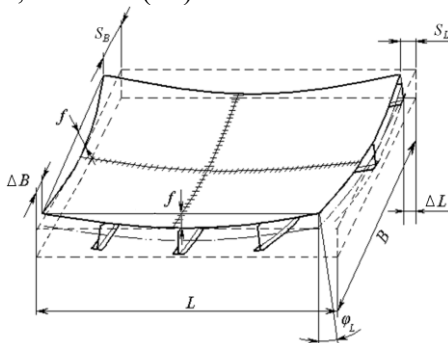


Рис. 1.1 – Общие деформации секций

¹⁾ Процесс образования сварочных напряжений и деформаций см. подробно в учебнике Бурмистров Е. Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте. – СПб. : Лань, 2020. – 552 с. : ил.

Общие деформации вызваны укорочениями сварных соединений (поперечными и продольными).

1.1.3. Местные деформации – это деформации отдельных элементов конструкции. К местным деформациям относятся:

а) **волнистость полотна** (рис. 1.2), возникающая вследствие потери его устойчивости от сжатия, вызываемого продольным укорочением стыковых сварных соединений;

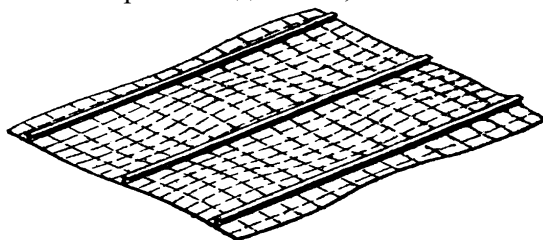


Рис. 1.2 – Бухтиноватость обшивки

б) **волнистость (бухтиноватость) обшивки** (рис. 1.2), возникающая вследствие потери её устойчивости от сжатия, вызываемого продольным укорочением соединений набора с обшивкой;

в) **волнистость кромок полотна** (рис. 1.3), вызываемая неравномерным поперечным укорочением по длине сварных соединений (например, при недоваренных концах набора или при наборе, не доходящем до кромок);

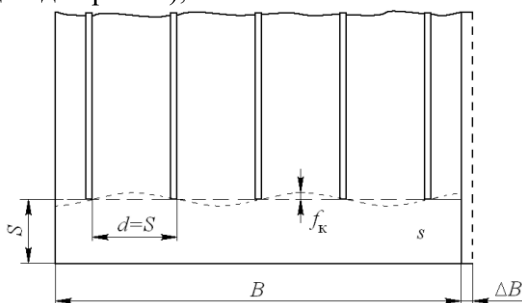


Рис. 1.3 – Волнистость кромок обшивки

г) **ребристость полотна** (рис. 1.4), вызываемая угловыми деформациями швов от приварки набора;

д) **«домики» по монтажным стыкам** (рис. 1.5), вызываемые неравномерным поперечным укорочением по толщине листов, то есть угловыми деформациями сварных соединений;

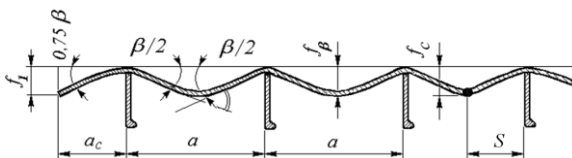


Рис. 1.4 – Ребристость полотна

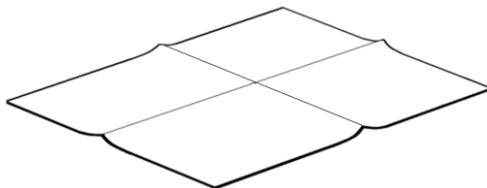


Рис. 1.5 – «Домики» по монтажным стыкам

е) «домики» по концам стыковых соединений листов полотна (рис. 1.6), возникающие вследствие потери устойчивости концов полотна, вызываемой продольным и поперечным укорочением стыковых соединений.

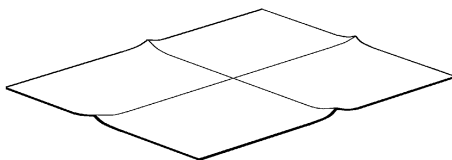


Рис. 1.6 – «Домики» по концам стыковых соединений

1.2. Определение основных параметров сварочных деформаций

Величины остаточных сварочных деформаций определяются в зависимости от теплофизических свойств свариваемых материалов, режимов и условий сварки, условий охлаждения, жёсткости и условий закрепления конструкции в момент сварки.

Параметры нагрева

1.2.1. Погонная энергия нагрева свариваемых элементов при наплавке одного валика зависит от режима сварки и определяется по формуле, Дж/см:

$$q_{\text{п}} = \frac{I_{\text{св}} U_{\text{д}} \eta}{v_{\text{св}}}, \quad (1.1)$$

где $I_{св}$ – сила сварочного тока, А;

U_d – напряжение на дуге, В;

$v_{св}$ – скорость сварки, см/с;

η – эффективный КПД. процесса нагрева конструкции сварочной дугой (при ручной сварке $\eta = 0,75$; при сварке в CO_2 $\eta = 0,70$; при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов $\eta = 0,40$ неплавящимся электродом и $\eta = 0,70$ – для плавящихся электродов).

1.2.2. Если режим сварки неизвестен, но даны размеры швов, погонную энергию нагрева определяют по приближённой формуле

$$q_{п} = \Theta \cdot F_{н} \text{ или } q_{п} = \Theta' \cdot k^2, \quad (1.2)$$

где $F_{н}$ – площадь сечения наплавленного металла шва, $см^2$;

Θ – коэффициент пропорциональности между погонной энергией нагрева свариваемых элементов и площадью поперечного сечения наплавленного металла шва, $Дж/см^3$, зависящий от вида сварки: для ручной сварки $\Theta = 64\,945$ $Дж/см^3$; для сварки в CO_2 $\Theta = 37\,710$ $Дж/см^3$; для сварки под флюсом $\Theta = 46\,090$ $Дж/см^3$; для аргонодуговой сварки $\Theta = 16\,760...50\,280$ $Дж/см^3$;

k – катет углового шва, см;

Θ' – коэффициент, зависящий от вида сварки: для ручной сварки $\Theta' = 39\,805$ $Дж/см^3$; для сварки в CO_2 $\Theta = 37\,710$ $Дж/см^3$; для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом $\Theta = 30\,377,5$ $Дж/см^3$; для аргонодуговой сварки $\Theta = 16\,760...50\,280$ $Дж/см^3$;

Площади наплавленного металла швов стыковых и тавровых соединений (конструктивные элементы приняты по ГОСТ 5264-80) определяются по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Площади наплавленного металла швов стыковых и тавровых соединений

Стыковые соединения, толщина листов		$F_{н}, \text{см}^2$	Тавровые соединения (один проход)			
V-образная разделка кромок	X-образная разделка кромок		по чертежу		среднестатистические	
			Катет шва, k , мм	$F_{н}, \text{см}^2$	Катет шва, k , мм	$F_{н}, \text{см}^2$
4	—	0,26	2	0,04	2,5	0,045
5	—	0,32	3	0,07	3,5	0,077
6	—	0,40	4	0,12	4,5	0,130
7	13	0,47	5	0,17	5,5	0,180

Продолжение табл.

Стыковые соединения, толщина листов		$F_{\text{н}}$, см ²	Тавровые соединения (один проход)			
V- образная разделка кромки	X- образная разделка кромки		по чертежу		среднестатистические	
			Катет шва, k , мм	$F_{\text{н}}$, см ²	Катет шва, k , мм	$F_{\text{н}}$, см ²
8	15	0,58	6	0,24	6,5	0,250
9	17	0,70	8	0,2×2*	8,5	0,21×2*
10	19	1,01	10	0,29×2* ²⁾	10,0	0,29×2*
11	21	1,10	12	0,42×2*	12,0	0,42×2*
12	23	1,30	—	—	—	—
14	27	1,70	—	—	—	—

1.2.3. При приварке стенки набора (или ребра жёсткости) толщиной s_p к полотнищу (или пояску набора) погонная энергия, идущая на нагрев полотнища (пояска) $q_{пп}$ и на нагрев стенки (ребра жёсткости) $q_{пр}$, определяется по формулам:

$$q_{пп} = K_{п} \cdot q_{п}; \quad (1.3)$$

$$q_{пр} = K_{р} \cdot q_{п}, \quad (1.4)$$

где K_p – коэффициент, определяемый по табл. 1.2.

$$K_{п} = 1 - K_{р}.$$

Таблица 1.2 – К определению коэффициента K_p

мм	K_p							
s_p	3	4	5	6	8	10	12	14
3	0,37	0,32	0,29	0,28	0,25	0,23	0,23	0,22
4	0,42	0,38	0,34	0,32	0,28	0,26	0,24	0,23
5	0,45	0,41	0,38	0,35	0,30	0,28	0,26	0,25
6	0,47	0,44	0,40	0,38	0,33	0,30	0,28	0,26
8	0,50	0,47	0,45	0,43	0,38	0,33	0,31	0,29
10	0,52	0,50	0,48	0,46	0,42	0,38	0,35	0,32
12	0,53	0,51	0,49	0,47	0,44	0,41	0,37	0,35
14	0,53	0,52	0,50	0,48	0,46	0,43	0,40	0,37

²⁾ Множитель – число проходов.

При сварке крестообразного соединения набора между собой погонная энергия, идущая на нагрев неразрезного элемента $q_{\text{пп}}$, определяется по формуле (1.3), разрезного элемента $q_{\text{пр}}$ – по формуле (1.4).

1.2.4. Интенсивность погонной энергии нагрева $\frac{q_{\text{п}}}{\sum s}$ – это по-

гонная энергия, приходящаяся на единицу толщины свариваемых элементов и распространяющихся в одну сторону от шва.

В расчётах принимают:

- при наплавке валика на кромку листа $\sum s = s$;
- при сварке встык двух листов $\sum s = s_1 + s_2$;
- при приварке ребра жёсткости к полотнищу $\sum s = 2s_{\text{п}} + s_{\text{р}}$.

1.2.5. Степень прогрева свариваемых элементов характеризуется удельной погонной энергией нагрева $\frac{q_{\text{п}}}{s_{i-1}^2}$:

а) **при сварке стыковых соединений без разделки кромок** $q_{\text{п}}$ определяют по формулам (1.1) или (1.2), а значение

$$s_{i-1} = \frac{s_1 + s_2}{2},$$

где s_1 и s_2 – толщины свариваемых листов, см.

При сварке стыковых соединений с разделкой кромок значение s_{i-1} равно суммарной высоте слоя шва, выполненного за предыдущие проходы;

б) **при сварке таврового или крестообразного соединения** (например, пересечений набора) для неразрезного элемента (или полотнища) $q_{\text{пп}}$ определяют по формуле (1.3), а $s_{i-1} = s_{\text{п}}$ или $s_{i-1} = s_{\text{пр}}$; для **разрезного** элемента (привариваемого ребра жёсткости) $2q_{\text{пр}}$ определяют по формуле (1.4), а $s_{i-1} = \frac{s_1 + s_2}{2}$, где s_1 и s_2 – толщины свариваемых элементов.

Для первого прохода стыковых соединений и для разрезного набора крестообразных соединений принимается сквозной провар.

Продольные укорочения сварных соединений

1.2.6. Остаточное продольное укорочение характеризуется объёмом продольного укорочения сварного соединения V , определяемого по формуле, см³:

$$V = l_{\text{ш}} \cdot v, \quad (1.5)$$

где $v = \sum v_i$ – для многопроходных швов;

v_i – объём продольного укорочения i -го прохода, приходящийся на единицу длины шва, см²;

$l_{\text{ш}}$ – длина наплавляемого шва, см;

$l_{\text{ш}} = l \frac{l_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}}$ – для прерывистого шва (l – длина соединения, $l_{\text{пр}}$ –

длина провара $t_{\text{пр}}$ – шаг прерывистого шва).

Центр тяжести объёма продольного укорочения при сварке встык принимается расположенным посередине толщины свариваемых листов, а при приварке набора – на внутренней поверхности полотноща.

1.2.7. В общем случае объём продольного укорочения 1-го прохода, приходящийся на единицу длины сварного соединения, находим по формуле, см²,

$$v_i = 0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \cdot K_{\text{T}} \cdot K_{\sigma}^1, \quad (1.6)$$

где $\frac{\alpha}{c\rho}$ – термофизический коэффициент свариваемого материала,

для малоуглеродистых и низколегированных сталей равен $2,98 \cdot 10^{-6}$ см³/Дж; для алюминиевых сплавов – $9,07 \cdot 10^{-6} \dots 9,79 \cdot 10^{-6}$ см³/Дж;

K_{T} – коэффициент, учитывающий влияние теплоотдачи. Для малоуглеродистых и низколегированных сталей при естественном охлаждении $K_{\text{T}} = 0,85$;

K_{σ}^1 – коэффициент, учитывающий влияние начального напряжения в конструкции. Для сварки встык за 2...3 прохода $K_{\sigma}^1 = 1$, при действии напряжений растяжения объём укорочений уменьшается $K_{\sigma}^1 = 1 - \beta$; при действии сжимающих усилий объём укорочений увеличивается $K_{\sigma}^1 = 1 + 1,8\beta$, где $\beta = \sigma_{\text{н}}/\sigma_{\text{T}}$, $\sigma_{\text{н}}$ – начальные напряжения; σ_{T} – предел текучести.

Для конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей при естественном охлаждении можно принять, см²:

$$v = 0,86 \cdot 10^{-6} q_{\Pi}, \quad (1.7)$$

для алюминисво-магнисвых сплавов, см²,

$$v = 2,86 \cdot 10^{-6} q_{\Pi}. \quad (1.7a)$$

1.2.8. При сварке тавровых соединений с двух сторон сплошными швами или цепными швами без разделки кромок объём продольного укорочения от двух швов определится по формуле

$$v = 1,15 \cdot v_M,$$

где v_M – объём продольного укорочения от одного прохода с максимальной погонной энергией, определяемой по формуле (6) при $K_{\sigma}^1 = 1$.

1.2.9. Объём продольного укорочения от швов подварки возникает только в случае, если погонная энергия подварки больше погонной энергии любого прохода сварки, и определяется разностью этих погонных энергий.

1.2.10. Продольное укорочение от сварки встык листов, кромки которых были обработаны тепловой резкой, будет возникать только в том случае, если интенсивность погонной энергии сварки будет больше интенсивности погонной энергии тепловой резки (при резке с ацетилено-кислородным подогревающим пламенем $\frac{q_{\text{п.рез}}}{\sum s} = 5237,6 \text{ Дж/см}^2$ и $q_{\text{п.рез}} = 10475s \text{ Дж/см}$; при газозлектриче-

ской резке $\frac{q_{\text{п.рез}}}{\sum s} = 1676 \text{ Дж/см}^2$ и $q_{\text{п.рез}} = 3352s \text{ Дж/см}$).

При этом суммарный объём продольного укорочения сварного соединения должен быть уменьшен на величину

$$v_{\text{Г.рез}} = 0,335 \cdot q_{\text{п.рез}} \frac{\alpha}{c\rho} K_{\chi}, \quad (1.8)$$

где K_{χ} – коэффициент, учитывающий влияние теплоотдачи, определяется при естественной теплоотдаче по таблице 2.3.

Таблица 1.3 – К определению коэффициента K_{χ}

S_{Π} , мм	4	6	8	10	12	14
ВСт3сп	0,81	0,85	0,92	1,0	1,0	1,0
СХЛ-4	0,90	0,93	0,95	0,97	1,0	1,0
АМГ 5В	0,85	0,86	0,89	0,90	0,93	0,96

При приварке к полотнищу набора, обработанного тепловой резкой, уменьшение суммарного объёма продольного укорочения должно быть равно половине величины $V_{г.рез.}$

Поперечные укорочения сварных соединений

1.2.11. Поперечные укорочения сварного соединения возникают от сближения свариваемых листов и от поворота их относительно друг друга (угловой деформации).

Величина поперечного укорочения и угловой деформации зависит от объёма поперечного укорочения, положения этого объёма по высоте рабочего сечения сварного соединения, жёсткости рабочего сечения и от условий внешнего закрепления.

1.2.12. Поперечные укорочения стыковых соединений листовых полотнищ из малоуглеродистых и низколегированных сталей, свариваемых в свободном состоянии на обычных режимах сварки, ориентировочно определяются по таблице 1.4.

Поперечные укорочения полотнищ от приварки набора сплошными угловыми швами с катетом k с одной стороны конструкций из малоуглеродистых и низколегированных корпусных сталей определяются по таблице 1.5.

Таблица 1.4 – К определению поперечных укорочений стыковых соединений листовых полотнищ из малоуглеродистых и низколегированных сталей, свариваемых в свободном состоянии на обычных режимах сварки

Толщина листов, s , мм		4	6	8	10	12	14
Поперечное укорочение ΔB , мм	при сварке под флюсом «на весу»	0,90	1,50	1,65	1,60	1,52	1,40
	ручная сварка с V-й разделкой	1,30	1,35	1,45	1,80	2,20	2,60

Таблица 1.5 – К определению поперечных укорочений полотнищ от приварки набора сплошными угловыми швами с катетом k с одной стороны конструкций из малоуглеродистых и низколегированных корпусных сталей

Толщина листов, s , мм	Толщина ребра, s_p , мм	Поперечные укорочения, ΔB , мм			
		$k = 3$ мм $q_n = 5028$ Дж/см	$k = 4$ мм $q_n = 8380$ Дж/см	$k = 5$ мм $q_n = 11732$ Дж/см	$k = 6$ мм $q_n = 16341$ Дж/см
4	3	0,025	0,044	0,064	0,085
	4	0,023	0,040	0,058	0,080

Продолжение табл. 1.5

Толщина листов, s , мм	Толщина ребра, s_p , мм	Поперечные укорочения, ΔB , мм			
		$k = 3$ мм $q_n = 5028$ Дж/см	$k = 4$ мм $q_n = 8380$ Дж/см	$k = 5$ мм $q_n = 11\,732$ Дж/см	$k = 6$ мм $q_n = 16\,341$ Дж/см
	6	0,022	0,037	0,053	0,075
	8	0,020	0,033	0,050	0,070
6	3	0,015	0,028	0,046	0,063
	4	0,014	0,026	0,043	0,058
	6	0,013	0,24	0,38	0,055
	8	0,011	0,022	0,035	0,050
8	3	0,008	0,018	0,031	0,045
	4	0,007	0,016	0,028	0,043
	6	0,006	0,014	0,026	0,040
	8	0,005	0,013	0,024	0,037
10	4	0,004	0,010	0,019	0,031
	6	0,004	0,008	0,017	0,029
	8	0,003	0,07	0,015	0,027
	10	0,003	0,006	0,014	0,025
12	6	—	—	0,010	0,021
	8	—	0,006	0,009	0,020
	10	—	0,005	0,008	0,018
14	12	—	0,004	0,007	0,017
	6	—	0,005	0,008	0,015
	8	—	0,005	0,007	0,014
	10	—	0,004	0,006	0,013
	12	—	0,003	0,006	0,012

1.2.13. Остаточное поперечное укорочение характеризуется объёмом поперечного укорочения сварного соединения W , определяемого по формуле

$$W = l_{\text{ш}} \cdot w, \quad (1.9)$$

$$w = \sum_{i=1}^n w_i, \quad (1.10)$$

где w_i – объём поперечного укорочения от одного прохода, приходящийся на единицу длины шва, см²;

n – число проходов сварного соединения.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru