

изменений органической части смеси зафиксировано на ИК-спектре, тем сильнее взаимодействие органических радикалов с активными центрами на поверхности силикатов. Таким образом, акриловый полимер является эффективным связующим для создания стеклопластиков.

1. Пустовойтов В.П., Килимов С.Л., Черномаз В.С. Стеклопластики в строительстве / Под ред. В.А.Телешова. – М.: Стройиздат, 1978. – 212 с.

2. Пустовойтов О.В. Трубчатые конструкции, армированные стеклопластиком // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.33. – К.: Техніка, 2001. – С.71-74.

3. Шутенко Л.Н., Пустовойтов В.П. Прогрессивные материалы и конструкции в городском строительстве и хозяйстве. – Харьков: ХГАГХ, 1999. – 127 с.

4. О взаимодействии метилметакрилата с силикатами минералов / Топильский Г.В., Бутт Ю.М., Буянов В.И., Горбань А.К. // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1975. – №12. – С.78-81.

5. Литвинова О.М. (Пустовойтова О.М.), Болквадзе З.Р. Наполняемость акрилового полимерраствора // Тезисы докладов XXX науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. – Харьков, 2000. – С.61.

6. Золотов С.М., Псурцева Н.А., Пустовойтова О.М. Исследование структурных изменений акриловой композиции при воздействии различных факторов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.51. – К.: Техніка, 2003. – С.68-73.

7. Исследования структуры граничных слоев полиметилметакрилата методом нарушенного полного отражения / Семенович Г.М., Липатов Ю.С., Гусев С.С. и др. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1978. – Т.20. – №9. – С.2000-2005.

8. Липатов Ю.С., Мойся Е.Г., Семенович Г.М. Исследование плотности ультразвука макромолекул в граничных слоях полимера // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1977. – № 1. – С. 125-128.

9. Дехант Н., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. – М.: Химия, 1976. – 72 с.

Получено 29.06.2006

УДК 693.814.25 : 791.002.237

В.И.ТОРКАТЮК, д-р техн. наук, С.М.ЗОЛОТОВ, Н.П.ПАН,
Л.А.НОХРИНА, кандидаты техн. наук, А.П.ДЕНИСЕНКО, О.Ю.ПРЫЖКОВА,
А.Н.НИВЕРЧУК, А.Л.ДАНИЛЕНКО, Ю.Л.ФЕСЕНКО

Харьковская национальная академия городского хозяйства

С.В.БУТНИК, канд. техн. наук

Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СВАРИВАЕМОСТИ, ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ И ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СВАРКЕ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ МОНТАЖА

Рассматриваются особенности влияния комплекса воздействий сварки на пространственно-временное развитие процесса монтажа строительных конструкций многоэтажных каркасных зданий.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью учета

воздействия процесса сварки на возведение многоэтажных каркасных зданий. Неполный учет этих воздействий отрицательно влияет на эффективность возведения многоэтажных каркасных зданий, а в отдельных случаях приводит и к тяжелым авариям.

Существующие исследования в этом направлении [1-3] не в полной мере освещают эти проблемы и не обеспечивают синергизма при возведении объектов многоэтажного каркасного строительства.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование комплекса параметров, возникающих в процессе сварки и их учета при выборе и оптимизации организационно-технологических решений по возведению многоэтажных каркасных зданий на основе поточных методов и использования средств комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Для исследования и определения эффективности сварки конструктивных элементов каркаса в процессе монтажа рассмотрим более подробно особенности сварки, закономерности создания шва и его поведение как в процессе сварки, так и в процессе эксплуатации.

Одним из основных показателей сварки является свариваемость. Согласно [1-4], *свариваемость* – это комплексная технологическая характеристика металлов и сплавов, выражающая реакцию свариваемых материалов на процессе сварки и определяющая техническую пригодность материалов для выполнения заданных сварных соединений, удовлетворяющих условиям монтажа и эксплуатации многоэтажных каркасных зданий. Свариваемость различных металлов неодинакова. Степень свариваемости представляет собой количественную или качественную характеристику, которая показывает, насколько изменяются свойства металла при сварке и выполнимо ли сварное соединение при определенных условиях. Например, на основе механических испытаний можно установить, насколько изменились прочность, пластичность, ударная вязкость и другие свойства металла под воздействием процесса сварки. Одной из наиболее существенных (преимущественно качественных) характеристик свариваемости является отсутствие горячих или холодных трещин в металле шва и околошовном участке.

Степень свариваемости разделяется на три основные категории: удовлетворительная, ограниченно удовлетворительная, неудовлетворительная.

Мерой количественной оценки свариваемости является совокупность показателей свариваемости, каждый из которых определяют сравнением показателей свойств сварного соединения с нормативным показателем того же свойства свариваемого металла или сплава.

Каждый показатель определяется в виде отношения значения, получаемого при испытании свойств сварного соединения к нормативному значению того же свойства или в виде разности между этими величинами. Однако следует учитывать, что некоторые показатели свариваемости, полученные путем технологических испытаний (например, пробы на сопротивляемость холодным трещинам), не имеют числового выражения и предназначены только для определения допустимой степени жесткости сварных соединений. Подобного рода технологические испытания характеризуют обычно определенный способ и режим сварки конкретного изделия и показывают пригодность или непригодность выбранного способа сварки. Показатель свариваемости на практике обозначают буквой *C*, в скобках указывают свойство, подлежащее испытанию. После скобки ставится индекс, который показывает, к какому участку сварного соединения относится результат и испытания, например *CC* – сварное соединение; *МШ* – металл шва; *С* – зона сплавления; *ЗТ* – зона термического влияния и т.д.

Показатель свариваемости закладных металлических деталей конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий по временному сопротивлению *BC* при испытании на растяжение металла сварного соединения может быть определен по формуле

$$C(BC)_{CC} = \frac{\sigma_{B.I}}{\sigma_{B.H}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\sigma_{B.I}$, $\sigma_{B.H}$ – временное сопротивление соответственно образцов сварных соединений и сварного металла.

В зависимости от требований, предъявляемых к конструктивному элементу каркаса на период монтажа и эксплуатации, а также от свойств металла закладных соединительных элементов каркаса с учетом свойств металла, из которого их изготавливают, свариваемость в процессе монтажа оценивают по совокупности характеристик.

Чем сложнее условия монтажа и эксплуатации конструктивных элементов каркаса, тем больше число характеристик, по которым оценивают свариваемость. Комплекс испытаний на свариваемость определяют в соответствии с конкретными требованиями, предъявляемыми к сварной конструкции конструктивных элементов каркаса. Согласно практике многоэтажного каркасного строительства [5-13] в указанный комплекс входят следующие испытания сварных соединений: на сопротивляемость образованию трещин; горячих при сварке (пробы на горячие трещины); холодных (замедленное разрушение, пробы на холодные трещины); на статическое растяжение сварного соединения или металла шва; на стойкость против искусственного старения; на

ударный изгиб металла шва или околошовного участка; на выносливость при циклических нагрузках; на твердость; на стойкость против коррозии; на длительную прочность при рабочих температурах.

Кроме того, в комплекс испытаний включают исследования макро- и микроструктуры сварного соединения и химический анализ металлов – основного и шва.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий для сварных соединений устанавливают комплекс испытаний (табл.1), которые делятся на три группы: исследовательские (И), технологические (Т), приемосдаточные (К).

Таблица 1 – Характеристики комплексного испытания металлов соединительных деталей элементов многоэтажных каркасных зданий

Группа	Подгруппа	Назначение испытаний	Описание и основные характеристики испытаний
1	2	3	4
И	И 1	Выполняется при разработке новых марок сплавов при соединении элементов каркасов и при исследовании марок, освоенных в строительстве при возведении новых серий многоэтажных каркасных зданий	Всесторонние лабораторные испытания образцов металла конструктивных элементов каркаса (основного) и зоны термического влияния, образованной при различных режимах сварки (наплавки) в процессе монтажа, в результате чего устанавливается химический состав, механические свойства, микроструктура, коррозионная стойкость монтажного соединения. Условия испытаний должны соответствовать условиям работы сварных соединений многоэтажных каркасных зданий как в процессе монтажа, так и в процессе эксплуатации
	И 1.1	Определяются изменения свойств металла при монтажной сварке конструктивных элементов каркаса в результате тепловых, механических и химических воздействий	
	И 1.2	Изучаются химические и физические взаимодействия соединяемых металлов, конструкций каркаса при определенных тепловых и механических условиях	
Т	Т 1	Разрабатывается рациональная технология сварки типовых конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий	Испытания проводятся по нормативам и типовым программам изготовителей конструктивных элементов каркаса. Кроме лабораторных стандартных образцов испытывают натурные узлы или их модели
	Т 1.1	Выявляется технологическая пригодность данной марки стали для изготовления конкретных соединительных элементов	
	Т 1.2	Устанавливаются нормативные значения показателей свариваемости данной марки стали в соединительных конструктивных элементах многоэтажных каркасных зданий	

Продолжение табл.1

1	2	3	4
К	К 1	Определяется качество сварки	Испытания проводятся по сокращенной программе, учитывающей результаты предшествующих испытаний по группе И. В программу входят лабораторные испытания стандартных сварных образцов и технологических проб с учетом наиболее благоприятных условий работы сварных соединений
	К 1.1	Устанавливаются показатели свариваемости металла в соединительных элементах каркаса и действительные свойства сварных соединений, кондиционность поставляемых конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий и данные вносятся в типовые проекты конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий, типовые узлы и детали (испытание проводит поставщик металла и заводы по изготовлению конструктивных элементов каркаса)	
	К 1.2	Определяется соответствие показателей свариваемости данных технологических условий в процессе монтажа (испытание проводит потребитель металла по мере надобности)	

Теория тепловых процессов при сварке, разработанная Б.Е.Патоном [2-4], позволяет с достаточной степенью точности рассчитывать термические циклы для разных сечений сварного соединения в зависимости от метода и режима сварки, толщины свариваемого металла, формы сварного соединения.

Термический цикл (рис.1) характеризуется максимальной температурой T_{max} , длительностью нагрева t_n при температуре T и скоростью охлаждения W_o . В зависимости от мощности источника тепла, степени его концентрированности и скорости движения длительность нагрева и охлаждения зоны термического влияния изменяются от долей секунды до нескольких минут. Таким же образом меняется и ширина – от 1-3 мм при ручной дуговой сварке до 10-20 мм при электрошлаковой сварке.

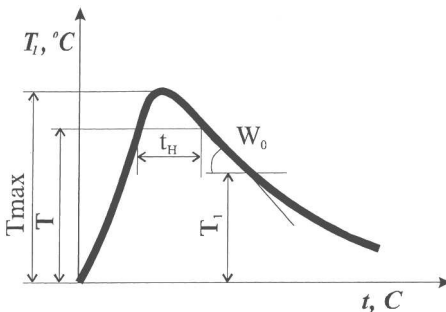


Рис.1 – Схема термического цикла при однопроходной сварке или наплавке

Зона термического влияния (ЗТВ) характеризуется неравномерным распределением максимальных температур нагрева, в этой зоне можно различить участки: старения 200-300°C; отпуска 250-650°C; неполной перекристаллизации примерно 700-800°C; нормализации 840-1000°C; перегрева 1000-1250°C и околшовный участок – несколько рядов, непосредственно примыкающих к линии сплавления, от 1250°C до температуры плавления. На этом участке резко изменяется структура металла, понижающая качество сварного соединения.

В период нагрева стали в интервале температур 700-900°C происходит превращение феррита и термита в аустенит. При температуре выше 900°C (около 1000°) начинается интенсивный рост зерна аустенита и его гомогенизация. Размер зерна аустенита (средний диаметр) на околшовном участке при ручной дуговой сварке составляет 0,1-0,15 мм; при однопроходной сварке под флюсом сталей толщиной 15-20 мм – 0,2-0,3 мм; при электрошлаковой сварке сталей больших толщин (100-200 мм) – 0,4-0,8 мм. На других участках зоны термического влияния размер зерна постепенно уменьшается, приближаясь к минимальному в зоне температур, близких к 900°C.

В зависимости от метода монтажной сварки и погонной энергии возможны два предельных случая: резкая закалка при быстром охлаждении. Для оценки характера превращений, протекающих в зоне термического влияния при охлаждении, пользуются анизотермическими (термокинетическими) диаграммами превращения аустенита (при непрерывном охлаждении), которые построены для большинства марок углеродистых и легированных сталей.

На диаграмму (рис.2) превращения аустенита наложен ряд кривых охлаждения, соответствующих термическим циклам различных способов сварки. Скорость охлаждения обычно оценивается в интервале наименьшей устойчивости аустенита (600-500°C). При малых скоростях охлаждения, соответствующих электрошлаковой сварке, превращение начинается с образования феррита и заканчивается образованием перлита.

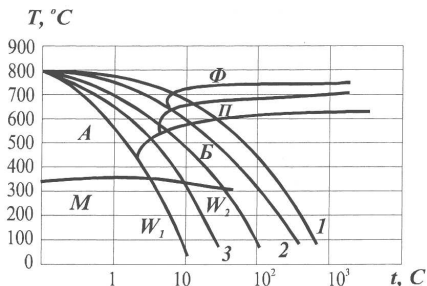


Рис.2 – Диаграмма анизотермического превращения перлита стали (схема)

При средних скоростях охлаждения (автоматическая сварка под флюсом) образуются перлит и бейнит, при большой скорости охлаждения – мартенсит и бейнит. При скорости более W_1 структура полностью мартенситная. Мартенситное превращение, протекающее с увеличением объема стали, обуславливает резкое повышение внутренних напряжений. При этом могут возникнуть зародыши трещин на границах зерен. Трещины постепенно раскрываются под влиянием остаточных сварочных напряжений в течение минут, часов и даже суток после сварки (замедленное зарушение). В зависимости от жесткости конструкции и величины напряжений холодные трещины могут появляться при высоком (60-70%) или низком (30-40%) содержании мартенсита в структуре зоны термического влияния.

Основным критерием свариваемости, определяющим монтажную и эксплуатационную надежность сварных соединений, является сопротивляемость образованию горячих и холодных трещин. Возникновение горячих трещин связано с химическим составом и условиями кристаллизации металла шва, что зависит от типа электродов, флюсов, защитных газов, типа сварного монтажного соединения, а также от числа переходов при сварке. Образование холодных трещин, в первую очередь, связано с химическим составом, толщиной свариваемых элементов, жесткостью сварного соединения и температурными условиями сварки.

Свариваемость основного металла закладных деталей или арматурных выпусков из конструктивных элементов каркаса можно предварительно оценить по его химическому составу посредством эквивалента углерода ($C_э$). Значения $C_э$ для некоторых марок низколегированных сталей приведены в табл.2.

Стали с содержанием $C_э = 0,2-0,35\%$ хорошо свариваются, при $C_э = 0,45-0,5\%$ допускают сварку без подогрева при толщине свариваемых элементов до 10 мм; при более высоком содержании $C_э$ необходима различная степень подогрева.

Таблица 2 – Процентное содержание $C_э$ в низколегированных сталях

Марка стали	Максимальное	Среднее
10Г2С, 09Г2	0,26	0,20
14Г, 15Г	0,28	0,23
15ГС, 10ХСНД	0,30	0,24
14Г2	0,31	0,26
20Г, 15Х, 14ХГС	0,34	0,28
15ХСНД, 18Г2С	0,36	0,29

Примечание: Максимальное значение $C_э$ соответствует содержанию углерода и легирующих элементов на верхнем пределе.

Для более полного выбора технологии сварки применяют валиковую пробу.

Суть валиковой пробы заключается в следующем. Для испытания наплавляется валик на сплошные или составные (рис.3) пластины при различной погонной энергии q / V м/Дж.м (ккал/см). Основным параметр режима – скорость охлаждения околошовного участка W_o при $T=600-500^{\circ}\text{C}$, связанная с величиной погонной энергии, толщиной свариваемого металла и температурой подогрева T_o .

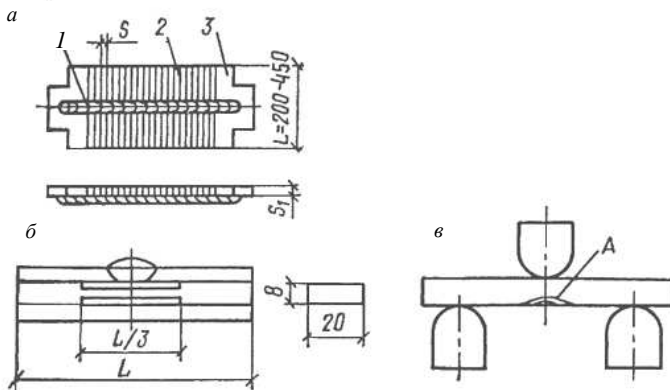


Рис.3 – Образцы валиковой пробы МВТУ:

a – составная пластина с наплавленным валиком; *б* – образец для испытания на статический изгиб; *в* – схема испытания; *A* – околошовный участок: 1 – валик; 2 – прямоугольные бруски; 3 – приставная планка.

Валиковая проба позволяет определить оптимальный параметр интервала скоростей охлаждения $\Delta W_{\text{опт}}$ для исследуемой стали. На основе данных об этом интервале может быть подсчитана погонная энергия сварки для соответствующей толщины стали и формы сварного соединения монтажного стыка. При наплавке валика на сталь постоянной толщины при малых погонных энергиях возможна подкалка металла околошовного участка, при слишком высокой – возможен перегрев. Оптимальный интервал погонных энергий устанавливается испытанием на ударный изгиб образцов, сваренных при разных погонных энергиях, а также другими методами испытания. Надрез образцов располагается по околошовному участку.

Составные пластины собираются из брусков с помощью специальных кондукторов. Их применяют при толщине стали ≥ 5 мм. Число брусков (размер $S \times S_1 \times L$) определяется из расчета необходимого

числа образцов для испытаний при одном режиме наплавки. Длина брусков L , предназначенных для исследования свойств металла околошовного участка 200-250 мм. При испытании разных участков зоны термического влияния (в том числе участка старения при $T=350-250^{\circ}\text{C}$) длина брусков зависит от скорости охлаждения следующим образом:

при $W_o > 10$ град/с $L = 250$ мм;
 $W_o = 5-10$ град/с $L = 350$ мм;
 $W_o < 5$ град/с $L = 450$ мм.

После наплавки и охлаждения составную пластину разламывают или разрезают на части. Из каждого бруска изготавливают образец для испытания на ударную вязкость. Дно надреза располагается по оси валика, ниже границы сплавления, на расстоянии не более 0,5 мм в сторону основного металла.

Образцы для испытания на статический изгиб вырезают из сплошных пластин (рис.3, б) поперек валика с таким расчетом, чтобы в растянутой зоне образца средней части находился околошовный участок. Образцы изгибаются до появления первой трещины, после чего измеряют угол изгиба. Величина угла изгиба устанавливается для серии образцов, валики на которых наплавлены при различной погонной энергии. Кроме того, может определяться твердость (по Виккерсу или Роквеллу) для различных участков зоны термического влияния, а также исследоваться микроструктура.

Свойства сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, не подвергаемых предварительной термической обработке, определяются степенью роста зерна аустенита и закалочными явлениями в околошовной зоне. Режимы их сварки выбирают на основе расчетов скорости охлаждения W_o и соответствующих им величин погонной энергии (Дж/м) по данным валиковой пробы (табл.3).

Интервал $\Delta W_{\text{опт}}$ устанавливается исходя из того, что ударная вязкость в зоне термического влияния должна быть при отрицательных температурах не ниже $0,3$ мДж/м² (3 кгс · с/см²). Для легированных сталей в термическом обработанном состоянии режим сварки должен обеспечить отсутствие холодных трещин в околошовном участке, минимальную степень разупрочнения в зоне высокого отпуска ($650-850^{\circ}\text{C}$). Это удается при относительно высоких скоростях нагрева и охлаждения околошовного участка (при монтаже колонн каркаса, диафрагм жесткости каркаса и др. в зимний период), допустимых при отсутствии трещин. Он определяется на основе проб жесткости и приближенно соответствует верхнему значению скоростей охлаждения

оптимального интервала $\Delta W_{\text{опт}}$.

Таблица 3 – Характеристика свариваемости закладных соединительных деталей многоэтажных каркасных зданий из низколегированных конструкционных сталей

№ п/п	Показатель	Марка стали				
		09Г2	14Г2	24Г	15ХГН	35ХГСА
1.	Эквивалент углерода $C_{\text{э}}$	0,225	0,32	0,34	0,35	0,56
2.	Состояние	После прокатки		Улучшенное	После прокатки	Улучшенное
3.	Толщина листа, мм	12	20	16	20	16
4.	Пределы оптимальных значений погонной энергии, $\frac{\text{мДж}}{\text{ккал/см}}$	$\frac{560-160}{14-4}$	$\frac{720-240}{18-6}$	$\frac{360-240}{9-6}$	$\frac{480-360}{12-9}$	$\frac{600-360}{15-13}$
5.	Оптимальная скорость охлаждения, $\Delta W_{\text{опт}}$, град/с	1-15	1-12	3,5	1,3-6	1-1,4
6.	Удельная вязкость, $\frac{\text{мДж/м}^2}{\text{кгс} \cdot \text{с/см}^2}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{0,6-0,8}{6-8}$	$\frac{0,7-0,74}{7-7,4}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{0,35-0,4}{3,5-4}$
7.	Температура перехода в хрупкое состояние T_k , °С	От 50 до 60	–	–	-60	-70
8.	Твердость околошовного участка НВ	190-216	220-270	230-270	250-265	390-440

Сварные соединения из низкоуглеродистых сталей большой толщины подвергают высокому отпуску (600-700°С) для устранения сварочных напряжений.

Важными критериями надежности сварных соединений конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий является обеспечение сопротивляемости образованию горячих и холодных трещин в сварных соединениях. Для обеспечения параметров эффективной сварки и надежности пространственно-временного развития процесса монтажа многоэтажного каркасного здания рассмотрим и проанализируем основные факторы, влияющие на качество свариваемости элементов каркаса.

Горячие трещины. Возникновение горячих трещин при сваривании закладных деталей сборных конструктивных элементов обусловлено химическим составом металла монтажного шва и характером процесса кристаллизации в зависимости от ряда монтажных факторов, степенью развития внутрикристаллической неоднородности, конст-

рукцией и жесткостью сварного соединения. Стойкость монтажного шва против образования горячих трещин определяется соотношением трех характеристик: диапазоном температурного интервала хрупкости, степенью пластичности в этом интервале и темпом нарастания упругопластических деформаций в нем.

Для количественной оценки сопротивляемости сварных монтажных швов и околошовной зоны образованию горячих трещин применяют *метод принудительной деформации*.

По методике Московского высшего технического училища им. Баумана (МВТУ), составной клавишный образец (рис.4) деформируется в продольном или поперечном направлениях путем вращения клавиш вокруг точки О. При этом от одной клавиши к другой скорость вращения увеличивается, на рисунке клавиши обозначены арабскими цифрами. Аналогичный метод используется на установке ИМЕТ-ЦНИИЧермет [14-16]. В обоих методах определяется скорость деформации $\gamma_{кр}$, мм/с, при которой появляются трещины.

Для оценки сопротивляемости монтажных сварных швов образованию горячих трещин анализируют *технологические пробы*, которые в основном дают качественную оценку сопротивляемости монтажного шва возникновению горячих трещин. Они выполняются на образцах постоянной формы и жесткости, а в некоторых случаях – переменной жесткости с разной шириной и глубиной надрезов. На рис.5 приведена составная листовая проба МВТУ для сталей малой и средней толщины. Пластины разной ширины соединены прихватами (что соответствует временному закреплению конструктивных элементов каркаса в процессе монтажа). Сварку ведут от узких пластин к более широким. Трещины образуются в местах пересечения стыка плоским сварным швом. Показателем стойкости служит минимальная ширина пластины, при сварке которой горячие трещины не возникают.

Проба Лихай (США) [16] широко применяется для оценки свариваемости листов большой толщины (рис.6). Образец представляет собой прототип оголовника колонн по серии ИИ-04, т.е. пластину с прорезями. Наплавку осуществляют в V-образную разделку. Степень жесткости образца определяется глубиной прорезей (отрезком X), при которой в образце не возникает трещин. От одного образца к другому глубина прорезей уменьшается (или увеличивается).

С увеличением содержания мартенсита в монтажных сварных соединениях конструктивных элементов каркаса в околошовном участке возрастает вероятность образования *холодных трещин*. Эти трещины очень опасны для сварных монтажных соединений элементов каркаса,

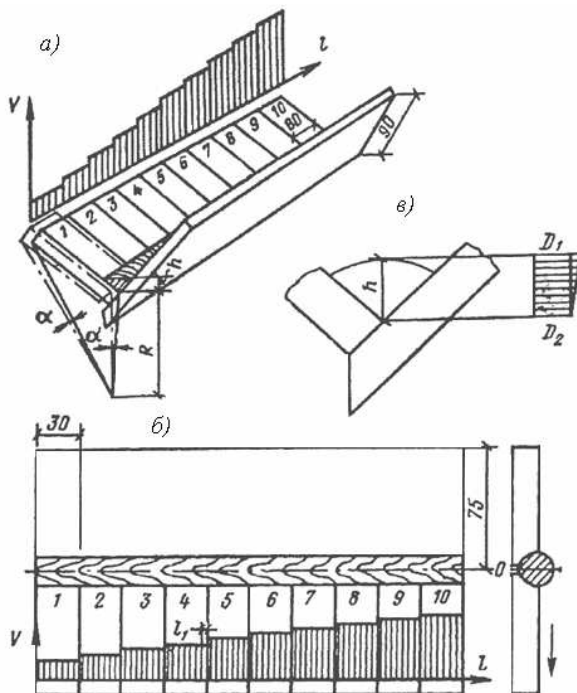


Рис.4 – Схема испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин по методу МВТУ. Последовательный изгиб клавиш при наплавке таврового соединения (а) и поперек валика (б); график изменения скоростей вращения клавиш (в); D_1 и D_2 – максимальная и минимальная деформации; 1-10 – номера клавиш.

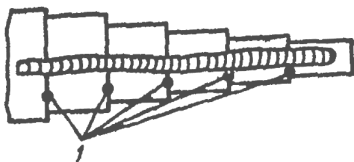


Рис.5 – Составная проба МВТУ (1 – прихватки)

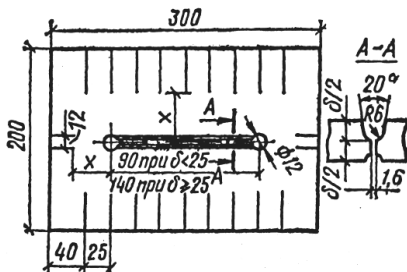


Рис.6 – Проба Лихай (США): δ – толщина образца (листа).

так как они раскрываются постепенно под воздействием растягивающих напряжений, величина которых в связи с нарастанием монтажных нагрузок, например, монтажом нескольких этажей, выше расчетного уровня, увеличивается особенно при развитии потока по вертикальной схеме [10]. Сопротивляемость образованию трещин (разрушению) оценивается по величине критического напряжения σ_{\min} , при котором при вращении происходит разрушение, монтаж нужно прекращать, а если это требование не выполняется, происходят тяжелые аварии [17, 18]. Для исследования используется методика ИМЕТ [16] и лабораторная технологическая проба ЛТП МВТУ [14, 19, 20].

Для сравнительной оценки склонности перлитных и мартеновских сталей к образованию холодных трещин применяются различные пробы жесткости. Среди них наибольшее практическое значение имеют пробы *крестовая* и *Кировского завода*.

Технологическую прочность оценивают по наличию или отсутствию трещин, их относительной протяженности, скорости охлаждения околшовного участка и по времени, прошедшему до появления первой трещины. Технологические пробы позволяют детально моделировать весь процесс сварки и судить о сопротивляемости образованию трещин в условиях, близких к реальным.

Крестовая проба получила широкое распространение в Украине, странах СНГ, США. Образец пробы (рис.7) собирают из одной пластины размером 180-150 мм и двух пластин размером 180-170 мм каждая, вырезанных из исследуемой стали. Прихваченные по торцам (модель обеспечения монтажной устойчивости конструктивных элементов каркаса с помощью прихватки [14]) пластины сваривают «в лодочку» в последовательности, указанной на рис.7. Ввиду большой жесткости пробы часть образцов подогревают до 100-250°C, контролируя температуру термопарой. Результаты испытания считают удовлетворительными, если на первых двух швах не обнаружено трещин. Если сталь менее стойка в отношении трещин, то образцы подогревают и оценивают результат по температуре подогрева, при которой не образовалась трещин.

Проба Кировского завода представляет собой пластину с цилиндрической выточкой по центру (рис.8), на которую наплавляют валик по диаметру выточки. Скорость охлаждения регулируют, понижая температуру нижней части пластины водой, воздухом или дополнительно подогревая ее до 100-150°C, с последующим охлаждением на воздухе. После сварки и выдержки в течение двух суток пластину разрезают, шлифуют и травят кислотой для выявления трещин. По ре-

результатам испытаний стали делят на четыре группы: хорошо сваривающиеся, не дающие трещин при охлаждении водой; удовлетворительно сваривающиеся, не образующие трещин при охлаждении на воздухе; ограниченно сваривающиеся, требующие предварительного подогрева до 100-150°C с охлаждением на воздухе и плохо сваривающиеся, для которых необходим подогрев до более высоких температур.

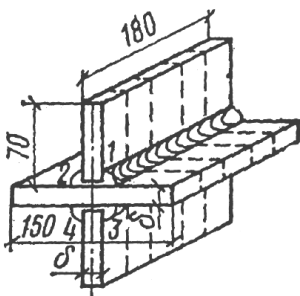


Рис.7 – Образец крестовой пробы:
1-4 – последовательность наложения швов;
 δ – толщина образца.

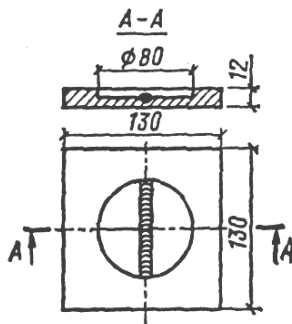


Рис.8 – Проба Кировского завода

Кроме перечисленных выше методов определения свариваемости осуществляют и другие механические и комплексные методы испытаний сварных соединений. Рассмотрим и проанализируем основные из них.

Испытания на статические растяжения. Эти испытания проводят на цилиндрических или плоских образцах, вырезанных из металла шва или монтажного сварного соединения. Испытания могут проводиться при нормальной, пониженной и повышенной температурах и служат для определения прочности и пластичности металла шва или сварного соединения.

Испытание на ударный изгиб. В комплексе механических испытаний, выполняемых для оценки свариваемости, испытание на ударный изгиб имеет особо важное значение. Оно является основным показателем для выбора параметров режима монтажной сварки (погонной энергии) при валиковой пробе для оценки стойкости сварных соединений при низких температурах (порог хладноломкости) и в других случаях выполнения монтажного процесса. В зависимости от цели испытания надрез делается (на предварительно протравленных образцах) по металлу шва, линии сплавления, околошовному участку или другим

участкам зоны термического влияния. Для определения ударной вязкости в зависимости от толщины основного металла применяются образцы разного сечения с полукруглым или острым надрезом. Для получения порога хладноломкости используют стандартные образцы с полукруглым надрезом (образцы Менаже). На каждое значение температуры испытывается 3-5 образцов. Результаты испытаний наносятся на график. Порог хладноломкости можно также оценить по виду излома ударных образцов. В этом случае определяется процент кристалличности в изломе. Установлено [21-23], что соотношение площадей кристаллической и волокнистой структуры в изломе изменяется пропорционально ударной вязкости.

Важным критерием качества сварного монтажного шва является его *твердость*. Определение локальной твердости различных участков монтажного сварного шва позволяют оценить те изменения, которые произошли в зоне термического влияния, на линии сплавления, и сравнить твердость металлов основного и шва. Наиболее существенным является определение околошовного участка при обнаружении возможных закалочных явлений, при сварке термоупрочненных сталей выявляются участок разупрочнения, его протяженность и степень разупрочнения.

Испытания на твердость выполняются, как правило, по Виккерсу или Роквеллу [24-27] на поперечных образцах, вырезанных таким образом, что они охватывают все участки (зоны) сварного соединения.

В процессе монтажа сварные соединения работают на изгиб (загиб). При испытании на изгиб устанавливается степень пластичности металла шва и сварного соединения конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий в целом. Пластичность оценивается величиной угла загиба до образования первой трещины в любом месте образца. Если при испытании образец не дает трещины, испытание доводится до параллельности сторон.

Образцы, в которых появляются надрывы глубиной до 0,5 мм по кромкам соединений и по шву, не считаются бракованными. Чаще всего образцы испытываются на изгиб поперек шва, реже вдоль основного шва. Результаты этих двух видов испытаний несравнимы между собой.

Наиболее эффективные методы оценки свариваемости – это комплексные методы испытаний. Эти методы предназначены для оценки изменений механических свойств и структуры основного металла в зоне термического влияния. Их обычно разделяют на две группы: образцы сварных соединений; образцы, на которых имитируется термическое воздействие сварки. К первой группе можно отнести валиковую

пробу, ко второй – методику ИМЕТ-1 и торцевую пробу (метод Кузмана [16]).

Наряду с механическими испытаниями и методами комплексных испытаний для обеспечения надежности монтажной сварки необходимо тщательное исследование макро- и микроструктуры, которые необходимы для оценки свариваемости сталей и правильного выбора режима сварки.

В процессе исследования макроструктуры шва при травлении образцов (темплетов), вырезанных поперек или вдоль монтажного шва, могут быть выявлены: форма и размеры шва, глубина провара; направление осей кристаллов, формы и размеры кристаллитов; ширина зоны термического влияния; размеры наиболее крупных зерен на околовом участке; распределение и относительное количество серы в металле – основном и шва.

К эффектам сварного монтажного соединения конструктивных элементов *многоэтажного* каркасного здания относятся непровары, горячие и холодные трещины, шлаковые включения значительных размеров. Для выявления макроструктуры шлифы, изготовленные из образцов, подвергаются травлению 10-25%-ным водным раствором азотной кислоты. Шлифы погружают в раствор или смачивают их ватным тампоном, пропитанным раствором, промывают и просушивают.

Для выявления серы используется способ Баумана [27], который заключается в том, что на темплет накладывается (по свету) фотографическая бумага, предварительно смоченная в 5%-ном растворе серной кислоты в течение 5-10 мин, и выдерживается 3 мин. При этом бумага на темплете не должна смещаться, пузырьки газа под бумагой удаляются проглаживанием резиновым валиком. В результате реакции между сульфидами железа FeS , марганца MnS и серной кислотой на фотобумаге бромистое серебро переходит в сернистое Ag_2S темно-коричневого цвета. Степень интенсивности окрашивания фотобумаги в коричневый цвет указывает на характер распределения серы. Для повторения отпечатка необходимо снять слой металла на глубину 1-2 мм.

Микроструктура определяется и анализируется следующим путем. После полировки и травления исследуют микроструктуру. Обычно для травления применяется 2-4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктура изучается с помощью микроскопов МИМ8, МИМ7, МИМ6 и др. при увеличении от 30 до 1000 раз. Стандартными увеличениями считаются 100, 200, 500 и 1000 раз.

До травления на полированной поверхности шлифа изучают распределение и характер неметаллических включений (FeO , FeS , Mn ,

MnS, *SiO₂*, *FeSiO₂*, *MnSiO₂* и др.). В основном прокатном металле, который наиболее часто используется для закладных деталей конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий, часть включений имеет вытянутую форму (*MnS*), часть – круглую. Количество включений нами оценивалось по балльной системе по ГОСТ 1778-70. В металле шва включения имеют преимущественно округлую форму. Их размеры (диаметр) оценивались по балльной системе, а количество включений, наблюдаемое в поле зрения при увеличении в 100 раз, не менее чем в 10 точках, позволяет определить общее содержание неметаллических включений их суммарную площадь в процентах к площади металла шва (табл.4).

Таблица 4 – Пятибалльная шкала для оценки размеров и количества неметаллических включений

Балл	Диаметр, мм			Средняя площадь, мм ²
	средний	наименьший	наибольший	
1	0,05	0,003	0,008	0,00002
2	0,01	0,008	0,015	0,0008
3	0,02	0,015	0,025	0,003
4	0,04	0,03	0,5	0,0013
5	0,08	0,06	0,1	0,005

Допустимое количество включений в металле шва пока не регламентировано.

После травления изучают характер структуры монтажного сварного соединения. В основном металле оценивают размер действительного зерна по ГОСТ 5638-65, наличие или отсутствие полосатой структуры по ГОСТ 5640-68, наличие видманштеновой структуры по пятибалльной системе по ГОСТ 5640-68. Если сталь подвергалась термической обработке (закалке и отпуску), то необходимо оценить характер структуры в связи с этим.

Исследование микроструктуры полезно сопоставлять с результатами измерения твердости, что особенно важно при изучении зоны термического влияния, в которой прежде всего исследуется околошовный участок (4-5 рядов зерен от линии сплавления). В околошовном участке оцениваются действительный размер зерна (средний диаметр, мм), характер структурных составляющих (феррит, перлит, бейнит, мартенсит и т.п.), определяемое визуально, пользуясь указаниями ГОСТа 5233-56. Очень важно знать при составлении бизнес-планов возведения объектов многоэтажного каркасного строительства [10, 28] твердость околошовного участка, так как обычно допускается твердость не более 350НВ. Если основной металл сварных соединений при

монтаже каркасов подвергался термоупрочнению, то необходимо тщательно исследовать участок разупрочнения, характер структуры, ширину участка, величину твердости (степень разупрочнения).

В металле сварного монтажного шва оценивается форма и размеры кристаллитов (столбчатые или разносные), характер и форма структурных составляющих (феррит, перлит, бейнит, мартенсит, карбиды, аустенит и т.п.), их количественное соотношение. При изучении микроструктуры необходимо тщательно проверять отсутствие таких дефектов, как трещины в околошовном участке или металле шва, закалочные явления на околошовном участке, явление сильного перегрева. Степень перегрева следует оценивать в соответствии с технологией монтажной сварки. Как показали исследования и опыт многоэтажного каркасного строительства [16, 29-37], каждый вид технологии и способ сварки обуславливают определенную степень роста зерна: допустимую и нормальную. Поэтому, оценка микроструктуры сварного монтажного соединения должна базироваться на достоверных сведениях по технологии сварочного процесса в период монтажа строительных конструкций многоэтажных каркасных зданий. Когда характер сварного монтажного соединения неизвестен, необходимо опираться на нормативные требования, технические условия на изделие и т.п. Во всех случаях исследование структуры сварного соединения должно сопоставляться с результатами механических испытаний.

Важнейшим фактором обеспечения надежности сварных соединений является химический состав и стойкость против коррозии сварного шва. При анализе химического состава основного металла (количественном химическом или спектральном) устанавливается соответствие заданной марки стали ГОСТу или ТУ. Химический состав металла шва должен отвечать типу и марке выбранного для сварки электрода, марке электродной проволоки, требованиям, предъявляемым сварному соединению, определенным соответствующим нормативам. Существенное значение имеет равномерность распределения химических элементов в металле шва на линии сплавления (в переходной зоне) и других участках, где возможна химическая неоднородность. В таких случаях выполняется локальный спектральный анализ (в точке), в основном для исследовательских целей для повышения эффективности сварочных работ в многоэтажном каркасном строительстве.

На оценку свариваемости влияет эквивалент углерода, который может быть определен на основе нормативного состава стали (по ГОСТу) или ее химическим анализом. Существенное значение для основного металла и шва имеет соотношение серы и марганца. Последний связывает серу, образуя соединения MnS , более тугоплавкие,

чем FeS и препятствующие возникновению горячих трещин в металле шва и зоне плавления.

Необходимо выдерживать следующие соотношения:

$$[MnS] / [S] \geq 22 \text{ при } C = 0,06 - 0,11 \%;$$

$$[MnS] / [S] \geq 30 \text{ при } C = 0,11 - 0,13 \%;$$

$$[MnS] / [S] \geq 60 \text{ при } C = 0,15 - 0,16 \%.$$

Кроме того, в основном металле и монтажном шве должно ограничиваться содержание газов ($O < 0,005$; $N < 0,0005$; $H < 0,005\%$) во избежание старения монтажного шва и снижения сопротивления его хрупкому разрушению.

Испытанию на межкристаллитную коррозию подвергаются сварные соединения из аустенита и аустенитно-ферритных нержавеющей сталей по методике, изложенной в ГОСТ 6032-75. Для испытаний изготавливаются образцы с перекрещивающимися односторонними и двухсторонними швами (рис.9), из которых вырезаются темплеты длиной 80 мм, толщиной 5 мм.

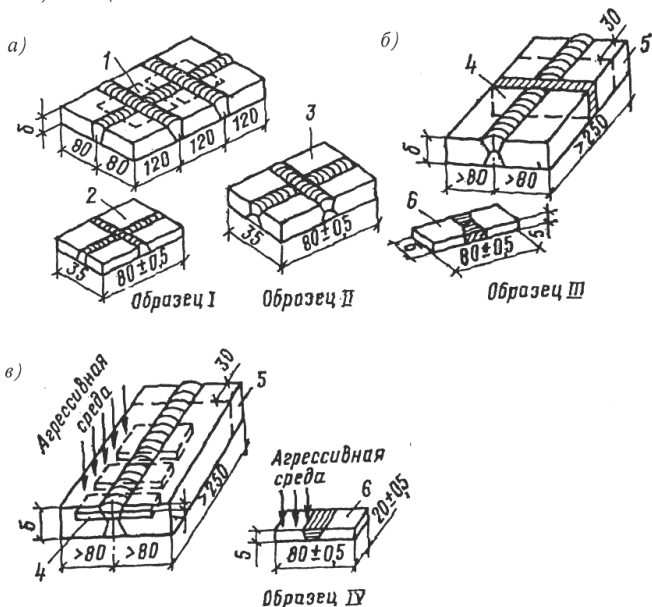


Рис.9 – Схема вырезки образцов сварных соединений для испытаний на межкристаллитную коррозию:

а – при толщине до 10 мм; *б* – то же, более 10 мм; *в* – для приемо-сдаточных испытаний; 1 – место вырезки образцов; 2 – контрольная поверхность при одностороннем соединении; 3 – то же, при двустороннем соединении; 4 – место вырезки образца; 5 – отход; 6 – контрольная поверхность.

Контрольная поверхность темплета защищается до чистоты 1,25. В зависимости от состава стали и нормативных требований используются методы А, АМ, В и Г. Наиболее распространенным является метод АМ. Он применяется для сварных соединений сталей ОХ18Н9, 1Х18Н9, Х23Н18, ОХ18Н9Т, 1Х118Н9Т, 1Х18Н12Т, Х18Н11Б. Образцы непрерывно кипятят в течение 24 ч в растворе: 0,16кг $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 100мл серной кислоты + 1л воды + медная стружка. После кипячения образцы промывают, просушивают и изгибают по зоне сплавления под углом 90°. При испытании на изгиб радиус закрепления губки тисок или оправки должен быть не менее трехкратной толщины образца, но не более 10 мм. Место изгиба осматривают с помощью лупы с 8-10-кратным увеличением. Наличие трещин служит браковочным признаком. Остальные методы отличаются по составу и длительности травления.

Важным источником обеспечения надежности монтажного сварного соединения являются тепловые процессы, которые происходят при сварке конструктивных элементов каркаса.

Для выполнения исследований с целью определения влияния тепловых процессов на сварные соединения рассмотрим особенности схем нагревания тела.

Распространение теплоты существенно зависит от формы и размеров тела. Однако точный учет конфигурации тел, который имеет место при сварке конструктивных элементов каркаса в процессе монтажа чрезвычайно усложняет расчет тепловых процессов. Поэтому при расчетах целесообразно упрощать формы рассматриваемых тел.

Основные расчетные схемы могут быть приняты следующими: *полубесконечное тепло* – при нагреве валиков на лист толщиной 30 мм и более при относительно небольшой мощности источника тепла; *бесконечная* или *полубесконечная пластины* – соответственно при однопроходной сварке пластин встык и при наплавке валика на торец пластины; *плоский слой* – при наплавке валиков на лист толщиной до 25-30 мм при относительно небольшой мощности источника тепла; *бесконечный* или *полубесконечный стержни* – при контактной стыковой сварке стержней, стыковой сварке арматуры и др.

Помимо вышеперечисленных, при монтаже строительных конструкций, в практике тепловых расчетов используются также и другие простейшие схемы.

Для оценки влияния тепловых процессов при сварке конструктивных элементов каркаса рассмотрим и проанализируем схемы сварочных источников тепла.

Основным элементом процесса сварки, как известно [38-43], является сварочная дуга, которую чаще представляют как сосредоточенный источник теплоты. При сварке на поверхности массивного тела (рис.10, а) предполагается, что для области, не слишком близкой к пятну дуги, источник теплоты точечный. При дуговой однопроходной сварке стыкового соединения листов (рис.10, б) источник теплоты линейный. При сварке стыкового соединения стержней (рис.10, в) считают, что источник теплоты плоский. При электрошлаковой сварке источник теплоты можно принять объемным, однако чаще всего его заменяют совокупностью линейных или плоских источников теплоты. Газовое пламя обычно считают круговым нормально распределенным источником теплоты.

Полная тепловая мощность дуги соответствует тепловому эквиваленту ее электрической мощности, т.е.

$$Q = U \cdot I, \quad (2)$$

где U – падение напряжения на дуге, В; I – ток, А.

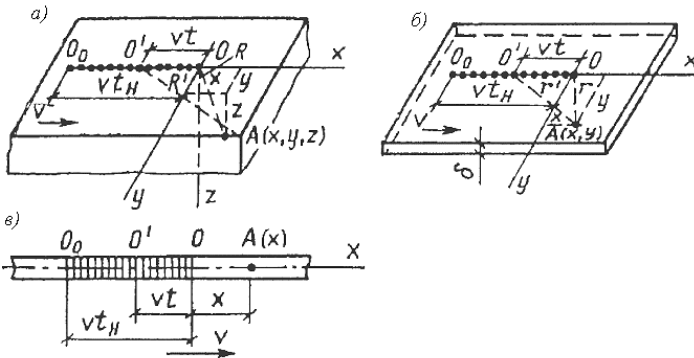


Рис.10 – Схема движения непрерывно действующего источника мощностью q , переместившегося в процессе сварки монтажного шва со скоростью v , из точки O_0 в точку O' : а – точечного на поверхности полубесконечного тела; б – линейного в бесконечной пластине; в – плоского в бесконечном стержне.

Эффективная тепловая мощность дуги есть количество теплоты, введенное за единицу времени в монтажные стыковые соединения конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий и затраченные на их нагрев

$$q = \eta_U \cdot U \cdot I, \quad (3)$$

где η_U – эффективный КПД процесса нагрева, величина которого имеет следующее значение (табл.5).

Таблица 5 – Значение η_U для различных видов сварки

№ п/п	Наименование и вид монтажной сварки	Значение η_U
1.	Сварка конструктивных элементов каркаса электродами: Металлическими угольными	0,7-0,85 0,5-0,7
2.	Под флюсом	0,8-0,95
3.	В газе: Углекислом аргоне электродом вольфрамовым Плавящимся	0,7-0,9 0,67-0,75 0,7-0,8
4.	Порошковой проволокой	0,8-0,9
5.	Газовым пламенем	0,3-0,8
6.	Электрошлаковая сварка: обычная при толщине листов, мм: 50 100 200 с порошкообразным присадочным металлом, при толщине листов, мм: 50 100	0,55 0,8 0,9 0,75-0,8 0,9

В расчетах тепловых процессов в процессе монтажной сварки конструктивных элементов каркасов, при назначении технологических режимов и в ряде других случаев пользуются значением энергии (Дж/м) сварки (q_{II}), представляющей собой отношение эффективной мощности дуги q к линейной скорости v :

$$q_{II} = q / v. \quad (4)$$

Важной составной частью обеспечения надежности сварных соединений в многоэтажных каркасных зданиях является обеспечение *оптимальной температуры* при дуговой сварке конструктивных элементов каркаса.

Располагая характеристиками источников теплоты (эффективной мощностью и ее распределением по поверхности или объему составляющих стыка конструктивных элементов многоэтажных каркасных зданий), можно рассчитать процесс распределения теплоты в металле стыка элементов каркаса, который имеет три стадии: *теплонасыщение* – характерно для начала сварки, когда температура в поле, перемещающаяся с источником теплоты, продолжает нарастать; *предельное квазистационарное* состояние, когда подвижное температурное поле практически устанавливается; *выравнивание температуры* – по окончании сварки конструктивных элементов каркаса.

Наплавка дугой валика на массивное изделие узловых соединений каркаса (например, серии ИИ 04) может быть описана схемой точечного источника теплоты мощностью q , перемещающегося по поверхности полубесконечного тела со скоростью v (рис.10, а).

Температура предельного состояния процесса выражается соотношениями:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v(x+R)}{2a}}, \quad (5)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (6)$$

где R, x, y, z – координаты рассчитываемой точки, начало координат совпадает с мгновенным местоположением источника (точки O', O и т.д.); e – основание натурального логарифма; λ – коэффициент теплопроводности, Вт ($^{\circ}\text{C}$); a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

В случае применения мощных быстродействующих источников теплоты (автоматическая сварка под флюсом, сварка мощным газовым пламенем и т.д.) уравнение для расчета температуры предельного состояния процесса распространения тепла точечного источника в полубесконечном теле имеет вид:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda vt} e^{-\frac{y^2+z^2}{4at}}, \quad (7)$$

где $t = x/v$ – время, прошедшее после пересечения дугой плоскости, в которой расположена рассматриваемая точка.

Температура предельного состояния процесса распространения тепла при нагреве пластины мощным быстродвижущимся линейным источником (рис.10, б) может быть определена по формуле

$$T = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\eta}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt}, \quad (8)$$

где δ – толщина листов, мм;

$$b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}. \quad (9)$$

Здесь c – удельная массовая теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$); γ – плотность тела, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c\gamma$ – удельная объемная теплоемкость ($\text{дж}/\text{м}^3/^{\circ}\text{C}$);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Начальная температура T_o учитывается путем ее сложения с величинами, полученными из правой части уравнений (5), (7), (8).

Значения теплофизических коэффициентов для различных металлов приведены в табл.6.

Таблица 6 – Теплофизические коэффициенты для некоторых металлов

Материал	T_{cp} , К	$c\lambda$, МДж/м ³ ·К	λ , Вт/м·К	α , м ² /(⁰ С·10 ⁻⁴)
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	500-600	5-5,24	37,7-41,9	0,075-0,09
Аустенитные стали	600	4,73-4,8	25-33,5	0,053-0,07
Медь	400	3,85-4	368-377	0,95-0,96
Латунь	350-400	3,47	117	0,34
Алюминий	300	2,72	272	1
Технический титан	700	2,85	16,8	0,06

Влияние ограниченности размеров изделия по толщине, ширине или длине на процесс распространения теплоты сварочной дуги учитывается по методу отражения. При этом предполагается, что ограничивающие поверхности не пропускают теплоты. Этот метод дает возможность вычислить температурные поля в листах средней толщины, у ребер, краев и углов изделий типа балок, коробок и др.

Основой для оценки влияния параметров режимов сварки на изменение структуры и свойств металла сварного соединения конструктивных элементов каркаса играет термический цикл при дуговой сварке и наплавке, т.е. изменение температуры в данной точке шва или околошовной зоне во время сварки.

Основные параметры термического цикла околошовной зоны при однопроходной сварке или наплавке – это максимальная температура T_{max} , мгновенная скорость охлаждения W_o , $^\circ\text{C}/\text{с}$ при данной температуре и дополнительном нагреве t_n выше данной температуры T (рис.1).

Для максимального тела (узла соединения каркаса) при наплавке валика мощной быстродвижущей сварочной дугой

$$T_{max} = (r_0) = \frac{1}{e} \cdot \frac{q}{vc\gamma \frac{\pi}{2} r_0^2}, \quad (10)$$

где r_0 – расстояние от оси перемещения точечного источника до рассматриваемой точки.

Для тонких пластин, свариваемых в стыковое соединение мощной быстродвижущей дугой

$$T_{\max}(y) = \frac{0,484q}{vc\gamma\lambda \cdot 2y} \left(1 - \frac{\lambda y^2}{\lambda\delta} \right), \quad (11)$$

где y – расстояние от точки до оси шва.

При дуговой наплавке валика на массивное изделие скорость охлаждения:

$$W_0 = \frac{2\pi\lambda(T - T_0)^2}{q/v}, \quad (12)$$

где T_0 – начальная температура закладных соединительных деталей элементов каркаса в процессе монтажной сварки.

При сварке стыкового соединения листов за один проход или при наплавке валика на лист малой толщины:

$$W_0 = \frac{2\pi\lambda c\gamma(T - T_0)^3}{(q/v\delta)^2}. \quad (13)$$

При наплавке валика на массивное тело:

$$t_{H.M.T.} = f_3 \frac{q/v}{\lambda(T_{\max} - T_0)}. \quad (14)$$

При однопроводной сварке стыкового соединения листов свариваемых элементов многоэтажного каркасного здания:

$$t_{H_0} = f_2 \frac{(q/v)^2}{\lambda c\gamma(T_{\max} - T_0)^2}. \quad (15)$$

Коэффициенты f_2 и f_3 выбирают в зависимости от безразмерной температуры $O = T - T_0 / T_{\max} - T_0$, изменяющейся в пределах от 0 до 1 по номограмме (рис.11).

При многослойной сварке сталей, склонных к закалке и образованию холодных трещин, необходимо проверять условие охлаждения первого слоя. Последующие слои при одинаковом поперечном сечении, как правило, остывают медленнее первого слоя, поэтому условия их охлаждения можно не проверять.

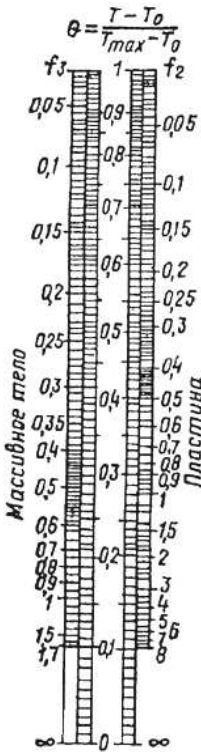
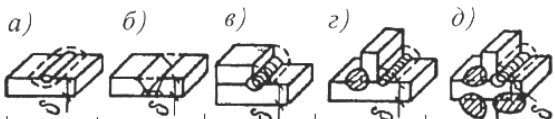


Рис.11 – Номограмма для расчета длительности нагрева выше заданной температуры T

Скорость охлаждения первого слоя многослойного шва рассчитывается по формуле (13) для наплавки валика. Различные условия теплоотвода в период монтажа элементов каркаса учитывают, вводя в расчет вместо истинных значений толщины свариваемых листов и погонной энергии дуги q/v их расчетные значения согласно рис.12.



	а)	б)	в)	г)	д)
δ_p	δ	$3/2 \delta$	δ	δ	δ
$(q/v)_p$	q/v	$3/2 q/v$	$2/3 q/v$	$2/3 q/v$	$1/2 q/v$

Рис.12 – Значение расчетной толщины δ_p и расчетной погонной энергии (q/v) для определения скорости охлаждения первого слоя многослойного шва по сопряжению конструктивных элементов каркаса:
а-д – виды сварных соединений.

Важным элементом обеспечения надежности прочностных параметров монтажного шва при сопряжении конструктивных элементов каркаса является определение рациональных геометрических очертаний и размеров непосредственно сварочной ванны.

Теоретически очертание ванны расплавленного металла должно соответствовать очертанию изотермы температуры плавления $T_{пл}$. Однако этого на практике реального монтажа конструктивных элементов каркаса не происходит, поскольку действительное очертание ванны зависит от параметров, которые не учтены при выводе уравнений распространения тепла по свариванию закладных деталей (распределенность тепла дуги, конвективные потоки жидкого металла, скрытая теплота плавления и др.).

Вследствие этого очертания металлической ванны, ее длину и ширину можно рассчитать по аналитическим зависимостям, в которые входят коэффициенты, получаемые опытным путем.

Для случая однопроходной сварки длина ванны расплавленного металла определяется соотношением [23, 26, 40, 42]:

$$L = 0,0503 \frac{1}{m} \cdot \frac{q}{\lambda v c \gamma \delta T^2}. \quad (16)$$

Ширина ванны

$$B = 0,242 \frac{2}{n} \cdot \frac{q}{v c \gamma \delta T_{пл}}. \quad (17)$$

Для случая электродуговой сварки стали Ст.3 коэффициенты $m = 0,0007 q/v$, $n = 0,00049 q/v - 0,2$.

Эти же зависимости можно использовать для соответствующих расчетов при электрошлаковой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Для электрошлаковой сварки $m = 1,2$; $n = 0,95$. С помощью зависимости (17) можно рассчитать глубину проплавления основного металла при электрошлаковой сварке H_{np} , если из полуширины $B/2$ ванны вычесть половину сварочного зазора $b/2$ (рис.13).

$$H_{np} = 0,242 \frac{1}{n} \cdot \frac{q}{vc \gamma \delta T_{пл}} - \frac{b}{2}. \quad (18)$$

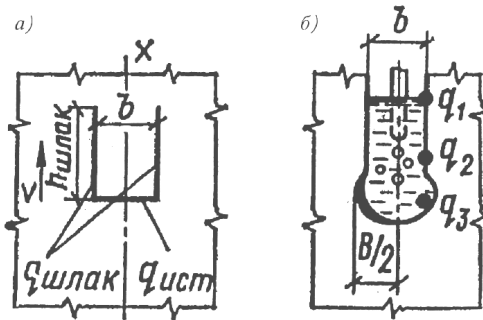


Рис.13 – Схема нагрева металла при электрошлаковой сварке:
 а – три плоских источника тепла; б – три линейных источника тепла;
 $q_1 = q_3 = 0,25 q_{эф}$; $q_2 = 0,5$.

Одной из наиболее характерных особенностей тепловых процессов при электрошлаковой сварке является значительная распределенность источников тепла. Схему нагрева обычно представляют приближенно как движение трех распределенных (плоских) источников тепла, двух шлаковых и одного металлического (рис.13, а), или как движение трех линейных источников тепла, движущихся по свариваемой кромке на определенных расстояниях друг от друга (рис.13, б).

Температура любой точки основного металла (рис.13, б) определяется суммой температур трех линейных источников, движущихся в пластине. Мощность источников и их взаимное положение приведены на рис. 13, б.

При электрошлаковой сварке с порошкообразным присадочным металлом (ППМ), которая находит все более широкое применение в многоэтажном каркасном строительстве вследствие резкого увеличения скорости сварки по сравнению с обычной электрошлаковой свар-

кой, термические циклы рассчитываются по схеме одного линейного источника тепла, движущегося в пластине. Этот линейный источник тепла следует располагать по оси шва на глубине 15-20 мм от поверхности шлаковой ванны, в тепловом центре процесса с температурой 2100-2150°C. Скорость охлаждения и длительность нагрева определяются по уравнениям (13) и (15).

При электродуговой сварке соединительных элементов многоэтажного каркасного строительства критерием выбора оптимального решения служит *скорость охлаждения*, при электрошлаковой сварке таким критерием является в основном *длительность перегрева* (время пребывания при температуре выше 900°C) металла околошовной зоны.

Скорость охлаждения при температуре 500-600°C для электрошлаковой сварки составляет обычно 0,3-1°/C, т.е. очень мала, а длительность перегрева исключительно велика (250-600 с), что способствует росту зерна околошовной зоны, образованию глубококристаллической структуры шва и понижению вследствие этого ударной вязкости соединения, особенно при отрицательных температурах.

Длительность перегрева при электрошлаковой сварке можно существенно снизить (до 90-150 с), например, применяя присадочный металл [38]. При этом значительно повышается ударная вязкость металла соединения конструктивных элементов каркаса при отрицательных температурах.

Эти критерии должны использоваться при выборе рациональных параметров пространственно-временного развития процесса монтажа многоэтажных каркасных зданий.

1.Бродский А.Я. Вопросы сварки современных отечественных стержневых арматурных сталей // Материалы 3-й Сибирской науч.-техн. конф. по сварке, наплавке и газопламенной обработке металлов. – Красноярск: Машпром, 1963. – 116 с.

2.Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – 218 с.

3.Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1969. – 189 с.

4.Патон Б.Е., Спыну Г.А., Тимошенко В.Г. Промышленные работы для сварки. – К.: Техніка, 1977. – 210 с.

5.Гельман А.С. Технология и оборудование контактной электросварки. – М.: Машгиз, 1960. – 219 с.

6.Егнус М.Я. Возведение каркасных жилых и общественных зданий. – М.: Стройиздат, 1972. – 295 с.

7.Егнус М.Я. Монтаж жилых домов повышенной этажности. – М.: Стройиздат, 1969. – 81 с.

8.Мотков Н.Г., Шериф Х.С. Реактивные напряжения продольной арматуры вследствие сварки выпусков в замоноличенных стыках сборных железобетонных колонн / ЦНИИС Госстроя СССР. Реферативный сборник. Межотраслевые вопросы строительства. Отечественный опыт. – М.: 1970. – №2. – С.6-11.

- 9.Торкатюк В.И., Бублик В.В. Интенсификация монтажно-сварочных работ при возведении многоэтажных каркасных зданий / В кн.: Пути сокращения применения ручного труда в строительстве. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Саратов, 1984. – С.126.
- 10.Торкатюк В.И., Соколовский С.Н., Покрасенко Л.Н. Строительство многоэтажных каркасных зданий. – М.: Стройиздат, 1989. – 368 с.
- 11.Черненко В.К. Методы монтажа строительных конструкций. – К.: Будівельник, 1982. – 208 с.
- 12.Helmut Ripke und Wladimir I. Torkatjuk. Die Berechnung der Stabilitätsfaktoren für den Montagezustand zweck Entwicklungsauswahl für Technologie und Organisation der Montageprozesse voll Zeitschrift der technische Univirsität Dresden Heft 2. – 1977. s. 7-12.
- 13.Torkatjuk W.I., Robenack K.-D., Hofmeister H. Technologie und Montagegenauigkeit Einflussfaktoren auf die Montagestabilität von Skeletbauten. // Bauplanung – Bautechnik. Heft 4, 1977. – s.175-179.
- 14.Справочник по специальным работам. 4.1. Сварочные работы в строительстве. – М.: Стройиздат, 1971. – 96с.
- 15.Справочник по сварке. Т.1.2 / Под ред. Е.В.Соколова. – М.: Машгиз. 1962. – С.416.
- 16.Сварка и резка в промышленном строительстве: Справочник монтажника / Б.Д. Малышев, А.И. Акулов, Е.К. Алексеева и др.; Под ред. Б.Д.Малышева. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1980. – 782 с.
- 17.Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. Вып.2. – М.: Стройиздат, ЦНИИСК, 1964. – 224 с.
- 18.Беляев Б.И., Корниенко В.С. Причины строительных конструкций и способы их устранения. – М.: Стройиздат, – 1968г. – 206 с.
- 19.Сварка на специальных и монтажных работах // Сб. статей. – М.: ЦБНТИ, 1964. – 118 с.
- 20.Richter H., Linke D. Zur Ruckstralungs – geometictypischer Umganzen bei der Ultraschallprüfung von Schweißverbindunge // Schweistechnik. – 1967. №5. – s. 41-46.
- 21.Бондарь В.Х., Шкуратовский Г.Д. Справочник сварщика-строителя. – К.: Будівельник, 1974. – 56 с.
- 22.Бродский А.Я. Технологические рекомендации по сварке арматуры железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1966. – 38 с.
- 23.Robenack K.-D. und Fitzner P. Zehn Jahre Arbeit mit schweistechischen Kennzahlen // Schweißtechnik. – 27 (1977)5. – s. 198-199.
- 24.Бродский А.Я. Состояние и перспективы развития контактной стыковой сварки железобетонных конструкций. – М.: Информэнерго, 1970. – С.173-179.
- 25.Волченко В.Н. и др. Контроль качества сварки. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
- 26.Денисов Л.С. Система предупредительно-статистического контроля сварочных работ на монтаже // В кн.: Механизация и автоматизация сварочного производства. – Могилев: ММИ, 1975. – С.7-9.
- 27.Петров Г.Л. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1977. – 286 с.
- 28.Баранников А.Ф. Организация управляемых производственных систем в строительстве. – К.: Будівельник, 1976. – 168 с.
- 29.Выжигин Г.В., Яковлев Г.М., Петров В.П. Совершенствование конструкций каркасов многоэтажных производственных зданий // Промышленное строительство. – 1982. – №5. – С.6-37.
- 30.Елагин А.В., Вексляр М.Ф. Электродуговая сварка порошковой проволокой. – М.: Стройиздат, 1973. – 48 с.
- 31.Торкатюк В.И., Бублик В.В. Влияние процесса сварки стыков железобетонных

конструкций на их эффективность. Деп. во ВНИИС Госстроя СССР. Регистр. №4600-84. Библиографический указатель депонированных рукописей. – 1984. – №1. – С.6.

32.Торкатюк В.И., Бублик В.В., Самохвалов В.В. Монтажные соединения стального каркаса электросталеплавильного цеха // Монтажные и специальные строительные работы. Сер. Изготовление металлических и монтажно-строительных конструкций. Экспресс-информация ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР. Вып. 7. – С.12-14.

33.Торкатюк В.И., Ляпина Н.Д. Обеспечение монтажной устойчивости многоэтажного стального каркаса. // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1982. – №1. – С.28-29.

34.Торкатюк В.И. Повышение надежности монтажа многоэтажных каркасных зданий // Информ. листок Харьковского ЦНТИ. Сер. Промышленное строительство. – 1975. – №288. – С.1-4.

35.Торкатюк В.И. Об учете фактора монтажной устойчивости при выборе оптимальной технологии возведения полносборных зданий // Информ. листок Харьковского ЦНТИ. Сер. Жилищное и гражданское строительство. – 1975. – №2617. – С.1-6.

36.Швиденко В.И., Торкатюк В.И., Гончаренко Д.Ф. Возведение многоэтажных каркасных зданий с наружными кирпичными стенами. – Харьков: ХО СНТО, 1981. – 62 с.

37.Röbenack K.-D. Zur statistischen Bedeutung und praktischen Beaufassung von Reaktionen – Spannungen // Schweißtechnik. – 21 (1971)5. – s. 203-205.

38.Алексеев Е.К., Мельник В.И. Сварка при строительных и монтажных работах. – М.: Стройиздат, 1969. – 118 с.

39.Бродский А.Я. Выбор способа сварки стыков толстой арматуры при монтаже. М.: Оргэнергострой, 1957. – С.1-8.

40.Волченко В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов. – М.: Стандарты, 1974. – 160 с.

41.Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. – М.: Машгиз, 1973. – 86 с.

42.Müller M., Röbenack K.-D. Schweißen im Stahlbeton und Montagebau. – Berlin: VEB, Verlag für Bauwesen., 1966. – 42 s.

43.Deutschmann E. Trockenstoß von Stahlbeton – Fertigteilstützen für Kraftwerksbau // Bauplanung – Bautechnik. – 19 (1965) 8. – S. 397-402.

Получено 26.05.2006

УДК 624.137.2 : 001.8

А.В.ФЕДУРУК

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ, АРМИРОВАННЫХ ГЕОТЕКСТИЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Приводятся результаты производственной апробации результатов лабораторных исследований устойчивости земляных откосов, армированных геотекстильными материалами.

Существуют технологии армирования откосов с углом, превышающим естественный [1-3]. Одна из них – технология послойного армирования откосов геосинтетическими материалами, которая позволяет устраивать откосы с углом до 80° [3].