Рис.4. Предельные кривые «контактное давление – скорость скольжения» с учетом зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости скольжения (1) и постоянном значении α (2), рассчитанном при скорости скольжения 5 м/с

Для определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров на основе теплового расчета уплотнений на основе фторопласта используются предельные кривые «контактное давление – скорость скольжения», рассчитанные по лимитирующему условию: $T < T_{\text{пред}}$ ($T_{\text{пред}} = 220$ °С) и позволяющие определять при известном коэффициенте трения допустимые значения давлений в уплотнении и скоростей скольжения. На рис. 4 допустимые сочетания значений давлений и скоростей скольжения для рассматриваемого уплотнения представляют координаты точек, ниже предельных кривых. Расчеты показывают, что значения предельных нагрузок, определенные с учетом зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости скольжения и при предположении его постоянства, могут существенно различаться (до 38 %).

Таким образом, определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров полимерных уплотнений по температурному лимитирующему условию необходимо учитывать зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости скольжения.

Работа выполнена в рамках Госзаказа Министерства науки и высшего образования РФ (№ 0377-2018-0001)

1. Зайцева К.В. Нормализация уплотнений вращающихся валов // Станки и инструмент. – 1956, №9. – С. 37-39.
2. Ваксман А.В. О стандартизации резиновых уплотнителей в гидравлических устройствах // Стандартизация. – 1957, №2. – С. 35-39.
3. Кондаков Л.А. Уплотнение гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1972. – с240.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е. М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

Старостин Н.П., Кондаков А.С., Тихонов Р.С.

**Определение технологических параметров электромужфтовой сварки
полиэтиленовых труб при низких температурах на основе анализа термоупругих
напряжений**

*ФГБУН Институт проблем нефти и газа
Сибирского отделения РАН
(Россия, Якутск)*

doi:10.18411/lj-11-2018-162

idsp: ljjournal-11-2018-162

Аннотация

Приводятся результаты вычислительных расчетов с варьированием управляющих параметров электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких

температурах окружающего воздуха. На основе вычислительных экспериментов из условий максимального сжимающего радиального напряжения в конце стадии нагрева (оплавления) и низкого значения напряжений и деформаций на стадии кристаллизации материала сварного шва предложен новый режим сварки.

Ключевые слова: электромужфтовая сварка, полиэтиленовые трубы, предварительный подогрев, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Введение. Разработка технологий сварки полимерных труб при низких температурах окружающего воздуха (ОВ) на основе исследования тепловых процессов проводилась в работах [1-2]. Критерием служила мера отклонения динамики температур при сварке в условиях низких температур от временных изменений температур сварки при допустимых температурах ОВ. При этом необходимо было обеспечить не только попадание временных зависимостей температур сварки при низкой температуре ОВ в «коридоры» допустимых кривых, но и обеспечить на стадии формирования сварного шва скорости охлаждения в зоне термического влияния в допустимом интервале. Тем не менее, достаточно было определить такой тепловой режим, при котором прочность сварного соединения будет не ниже прочности соединения при допустимой температуре ОВ, составляющая 0,8-0,85 прочности основного материала.

При предположении, что низкие показатели прочности сварного соединения по сравнению с основным материалом обусловлены термомеханическим поведением полимерного материала в данной работе предлагается при сварке в условиях низких температур определить управляющие параметры, используя расчетные значения термоупругих напряжений и деформаций. При этом управляющие параметры определяются из условия максимума сжимающих радиальных напряжений в момент завершения нагрева (оплавления) и минимума напряжений и деформаций в конце стадии формирования материала сварного шва.

Несмотря на то, что термоупругие напряжения при установлении однородного температурного поля исчезают, сравнительный анализ термоупругих состояний сварных соединений на стадии завершения кристаллизации материала сварного шва позволит оценить начальные технологические напряжения и деформации, которые в последующем приведут к остаточным напряжениям. Известно, что остаточные напряжения остаются, если температурные напряжения будут выше предела текучести. Интенсивный рост остаточных напряжений происходит при более низких температурах, когда модуль упругости материала и предел текучести возрастают [3]. Значения технологических напряжений и деформаций на стадии формирования сварного шва в некоторой мере характеризуют значения остаточных напряжений, обуславливающих прочность соединений.

Результаты расчетов. Вычислительные расчеты проводились в среде свободной вычислительной программы Dolphin/FeniCS. Приведем результаты определения параметров электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб для газопроводов диаметром 63 из ПЭ100 SDR 11 при температуре окружающего воздуха - 40 °С. Проводилось множество расчетов с варьированием параметров сварки и выбирался режим сварки, удовлетворяющий критерию максимума сжимающих радиальных напряжений во время завершения нагрева (оплавления) и минимума напряжений и деформаций в конце стадии формирования материала сварного шва. Расчетами найден режим со следующими параметрами: напряжение предварительного подогрева $U=6В$, максимальная температура подогрева $T_{\text{подогр}}=45^{\circ}\text{C}$, продолжительность подогрева $t_{\text{подогр}}=1339$ с, продолжительность охлаждения для выравнивания температур $t_{\text{вырав}}=120$ с, максимальная температура после выравнивания $T_{\text{max}}=34,4^{\circ}\text{C}$. Заметим, что предварительный подогрев, выравнивание температуры и

процесс сварки проводился под слоем теплоизоляционного материала. Расчетами определена максимальная толщина слоя теплоизоляции равная 2см, выше которой не приводит к снижению напряжений в конце стадии охлаждения.

На рис. 1 представлены распределения деформаций в момент кристаллизации полиэтилена. В пределах свариваемых участков распределение радиальных перемещений близко к однородному. В осевом направлении перемещения неоднородны и достигают максимальных значений в окрестности стыка края муфты с трубой, т.е в холодной части, где сварка не производится.

Рис.1. Распределения радиальных а) и осевых б) перемещений в момент времени 430 с

В зоне сварки осевые напряжения в трубе сжимающие, в муфте – сжимающие напряжения переходят в растягивающие (рис.2,а). В стенке трубы максимальные напряжения возникают вне зоны соединения, в которой температуры были ниже 80°C. При таких температурах полиэтилен не меняет структуру и его предел текучести составляет около 19 МПа. Поскольку в этом месте напряжения меньше предела текучести, то остаточные напряжения не возникают. Растягивающие радиальные напряжения достигают максимальных значений в окрестности расположения спиралей (рис.2,б). Несмотря на неоднородность температуры по осевой переменной, осевые напряжения достаточно однородны и близки нулю (рис.2,с). В окрестности зоны сварки наибольшие напряжения возникают вокруг витков нагревательного элемента (спирали).

Рис.2. Распределения окружных а), радиальных б) и осевых с) напряжений в момент времени 430с

Полученные результаты расчетов являются первым шагом поиска оптимального сочетания параметров сварки при низких температурах. На основе анализа результатов первого шага расчетов можно выявить закономерности влияния параметров на значения термоупругих напряжений и далее определить уточненные параметры сварки проведением следующей серии расчетов. В полученном сочетании параметров имеется возможность получения более однородного распределения температуры после подогрева увеличением продолжительности охлаждения и достижения после выравнивания температур значения максимальной температуры меньше 34,4°C. Расчеты с варьированием продолжительности выравнивания температур показывают, что существенное уменьшение напряжений и деформаций в момент завершения кристаллизации не достигается. Уменьшение напряжения в электрическом источнике

теплоты для получения более однородного температурного поля в соединении приводит к заметному увеличению продолжительности подогрева, что нежелательно.

В таблице 1 приводится полученное расчетом сочетание технологических параметров, при котором напряжения и деформации в момент завершения кристаллизации ниже, чем при параметрах, найденных на первом шаге поиска. Новые расчетные параметры сварки: напряжение предварительного подогрева $U=8В$, максимальная температура подогрева $T_{\text{подогр}}=80^{\circ}\text{C}$, продолжительность подогрева $t_{\text{подогр}}=1086$ с, продолжительность охлаждения для выравнивания температур $t_{\text{вырав}}=2141$ с, максимальная температура после выравнивания $T_{\text{max}}=20^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1

**Интервалы изменения термоупругих напряжений и деформаций в
электросварном соединении в моменты завершения нагрева ($t=68\text{с}$)
и охлаждения ($t=430$ с)**

U, В	$T_{\text{подогр}},$ $^{\circ}\text{C},$ $t_{\text{подогр}},$ с	$t_{\text{вырав}},$ с	$T_{\text{max}},$ $^{\circ}\text{C}$	t, с	Напряж. окруж., МПа	Напряж. рад., МПа	Напряж. осев., МПа	Перем. осев., мкм	Перем. рад., мкм
8	80 1086	2141	20	68	-2.26; 0.555	-2.27; 0.576	-2.32; 0.563	-132; 0	-33.1; 14.9
				43 0	-0.319; 0.339	-0.238; 0.985	-1.43; 0.338	-119; 0	-3.78; 41.3

Заключение. Сочетание найденных технологических параметров сварки лучше всех исследованных вариантов удовлетворяет критерию максимума давления между муфтой и трубой в момент завершения нагрева и минимума напряжения и деформации в момент завершения кристаллизации. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО РФ (проект № АААА-А17-117040710038-8 от 07.04.2017 г.)

1. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Управление тепловым процессом электромужфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С.21–25.
2. Старостин Н.П., Аммосова О.А. Моделирование процесса охлаждения при стыковой сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Технология машиностроения. 2016. №3. С.62-66.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения.- Москва: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1963. – 232 с.

**Таткеева Г.Г., Абатова Х.Н., Юров В.М.
Распределенные электрические сети и закон Мура**

*Карагандинский государственный технический университет
(Казахстан, Караганда)*

doi:10.18411/lj-11-2018-163

idsp: ljjournal-11-2018-163

Аннотация

Рассмотрена простая статистическая модель зависимости размера предприятия от числа потребителей электроэнергии. В результате получена экспоненциальная зависимость, которая формально совпадает с известным законом Мура. Показано, что ограниченность закона Мура определяется временем жизненного цикла системы.

Ключевые слова: статистическая модель, потребитель энергии, закон Мура, жизненный цикл.