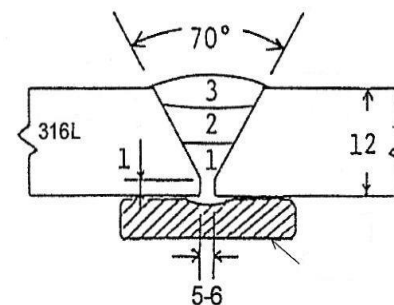


СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ СВАРКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Санкт- Петербург, Ноябрь 2016, Крон СПб

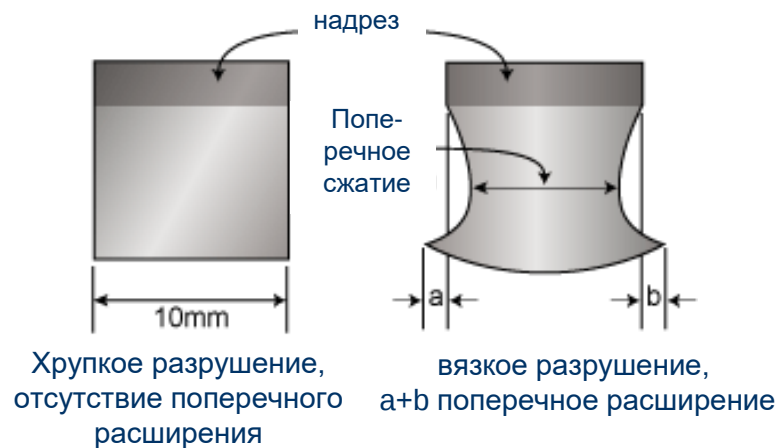


Авторы: А.Д. Каштанов, к.т.н, (ФГУП ЦНИИ КМ Прометей), Е.Я. Байгузин, к.ф.м.н. (ФГУП ЦНИИ КМ Прометей), А.Л. Гавшинский (ООО «Крон-СПб»)

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Аустенитные нержавеющие стали типа AISI 304/304L и AISI 316/316L часто используют для хранения или транспортировки сжиженного натурального газа.

высокие требования по ударной вязкости при низких температурах и поперечному расширению



Контролируемое низкое содержание ферритной фазы в наплавленном металле позволяет достигать необходимые значения этих свойств.

Группа 308L по AWS

Обеспечение специального баланса основных химических элементов для обеспечения низкого значения FN наплавленного металла.

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Объем природного газа при его сжижении уменьшается в 620 раз, что повышает эффективность использования инфраструктуры для его хранения и транспортировки. Основным «недостатком» сжиженного газа является необходимость поддержания низких температур. Ниже представлены основные конструкционные материалы, применяемые для изготовления криогенного оборудования

материал	Тип	Применение
9Ni	Сталь с 9% никеля	Ёмкости хранения
304L/316L	Нержавеющая сталь AISI 304L/316L	Трубопроводы, малые сосуды, большие ёмкости хранения
36NiFe	Сплав с низким коэффициентом расширения 36%Ni-Fe (инвар)	Большие ёмкости хранения, критические трубопроводы, призматические судовые танки для перевозки СПГ
Al	Сплавы алюминия 5083 (Al- 4,5% Mg), Сплав 5154 (Al-4,5% Mg) Сплав 6000 (Al-Si)	Сферические судовые танки для перевозки СПГ, трубные пучки для основных криогенных теплообменников, поковки.

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Прочностные свойства сталей для криогенного применения.

Жидкий азот – 196 °С ↔ испытания ↔ СПГ –158...–163 °С.

Механические свойства, так же как и ударная вязкость зависят от содержания феррита в наплавленном металле. Понижение эксплуатационной температуры увеличивает прочностные характеристики сварного соединения. На рисунке представлены SS (strain/stress) кривые зависимости деформаций от напряжения для стали AISI 304

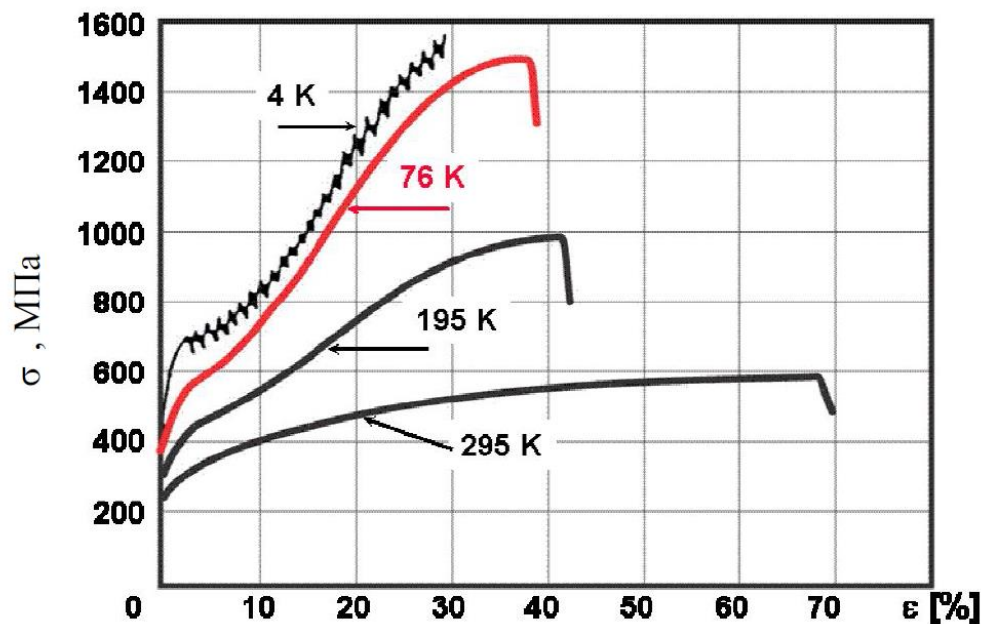
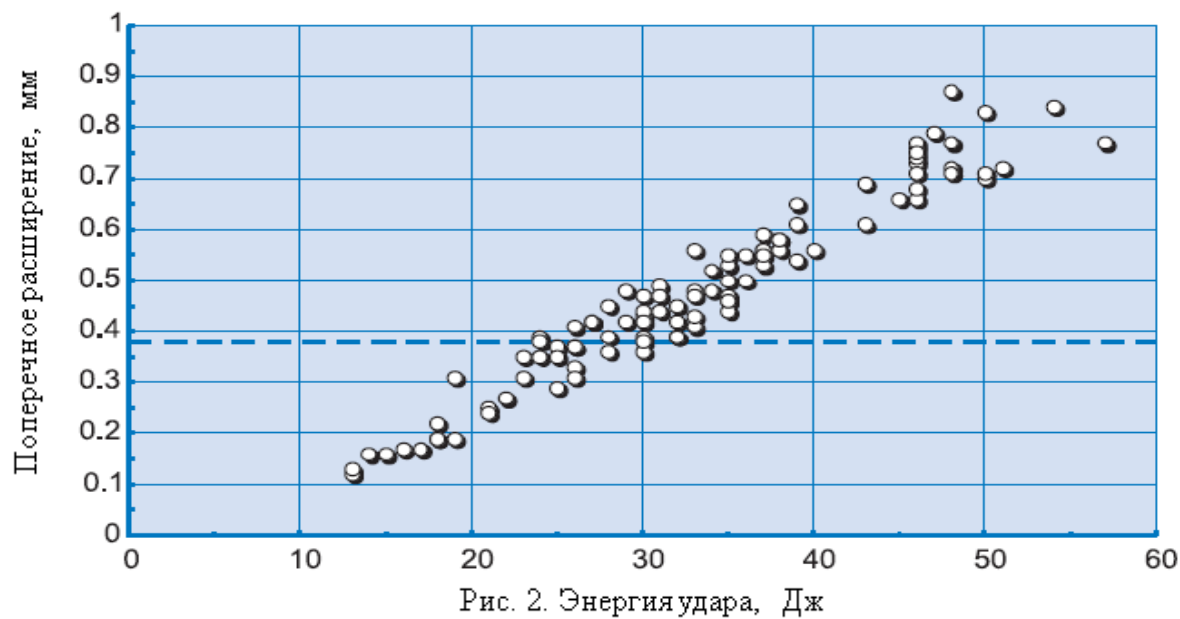


Рис. 1. Равномерная деформация,

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Прочностные свойства сталей для криогенного применения.

Существует корреляция между энергией удара и значениями поперечного расширения при низких температурах. Данная корреляция зависит от вида сварочного процесса, типа сварочного материала, а также шлаковой системы



На рисунке представлена зависимость поперечного расширения и энергии удара при -196°C , определённая для наплавленного металла, выполненного сварочными электродами типа AWS E 316L-16, диаметр электрода 3,2 мм.

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Ударная вязкость и содержание ферритной фазы

Очень важной является зависимость между содержанием дельта феррита и энергией удара наплавленного металла. При высоких содержаниях феррита ударная вязкость существенно снижается, по сравнению с ударной вязкостью при низких содержаниях феррита.

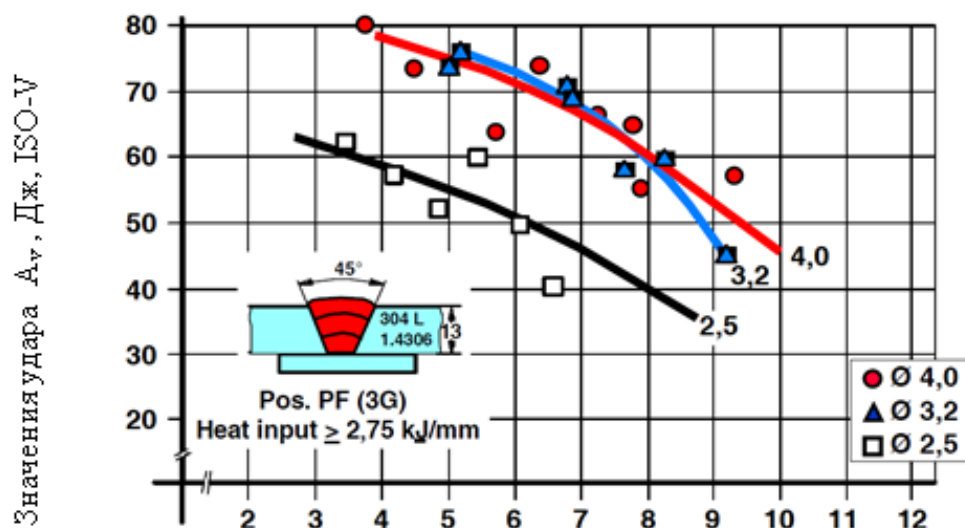


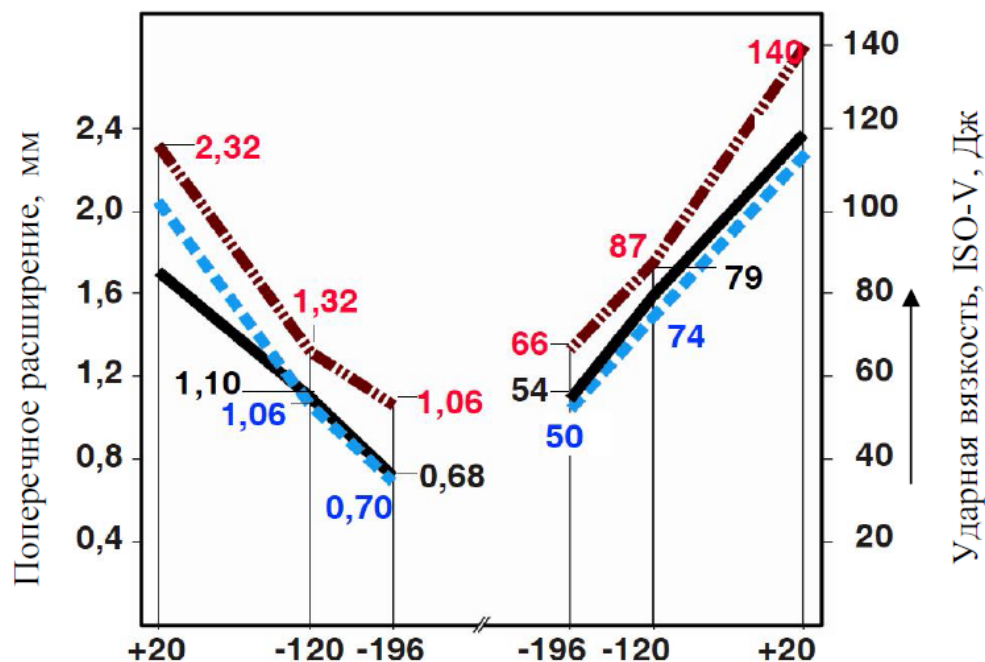
Рис. 3. Содержание феррита (FN)

На рисунке представлены результаты определения зависимости между содержанием ферритной фазы и ударной вязкости в металле, наплавленном электродами типа AWS E 308L-15 при температуре испытаний - 196°C. Соединение выполнено при высоких значениях погонной энергии. Сварка в нижнем положении.

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Ударная вязкость и содержание ферритной фазы

Благотворное влияние низкого содержания феррита на ударную вязкость при низких температурах так же сохраняется при определении ударной вязкости при температурах более высоких. На диаграмме эта зависимость хорошо прослеживается. То же можно сказать про зависимость между ударной вязкостью и поперечным расширением.



Наплавленный металл
Образец согласно AWS
A5.4

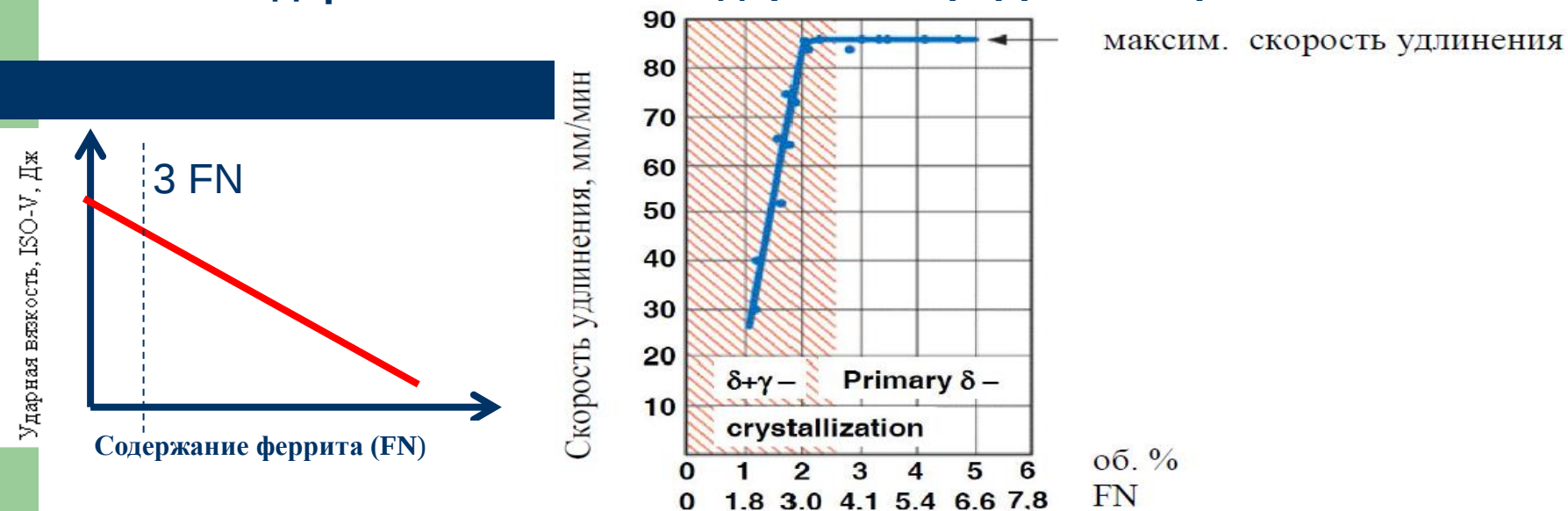
Измерения феррита
проводились
ферритоскопом MP 30

- 9,1-11,7 FN
- 7.1-9.2 FN
- ... 4.3-6.3 FN

Рис. 4. Температура испытаний, °C

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Ударная вязкость и содержание ферритной фазы

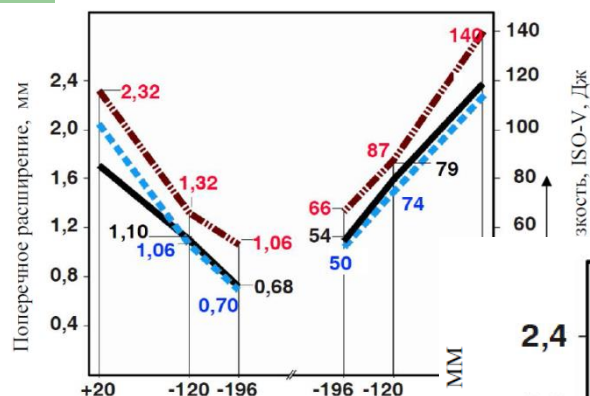


Содержание дельта феррита является решающим фактором на уровень ударной вязкости аустенитных сталей при низких температурах. Чем ниже содержание дельта феррита, тем выше показатели ударной вязкости и поперечного расширения. Если основываться на этой точке зрения, то содержание феррита должно быть минимально возможным, что бы гарантировать приемлемые значения ударной вязкости при -196°C .

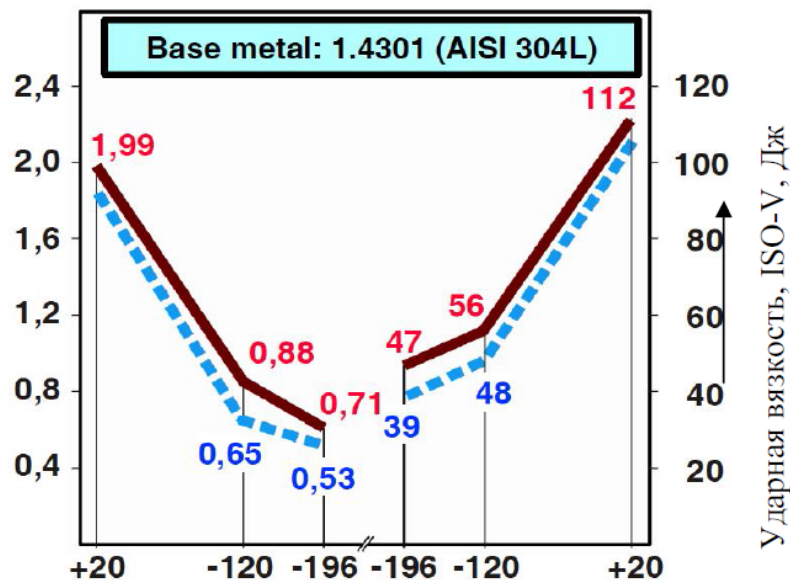
Минимально возможное содержание дельта феррита в наплавленном металле необходимо что бы предотвратить возможность образования горячих трещин. Остаточное содержание дельта феррита должно быть не меньше 3 FN при любом способе сварки, что даёт гарантию отсутствия горячих трещин в сварном соединении. При содержании феррита менее 3 FN чувствительность к образованию горячих трещин радикально возрастает, что наглядно демонстрирует представленная зависимость, полученная в результате испытаний на плоскостное растяжение (PVR)

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Ударная вязкость и содержание ферритной фазы



Чистый наплавленный металл



Сварное соединение

Толщина 13 мм
Положение сварки: РА
(нижнее)

Измерения феррита проводились ферритоскопом МР 30

- 7.8-10.2 FN
- 5,0 - 6.1 FN

Рис. 6. Температура испытаний, °C

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Факторы влияющие на содержание ферритной фазы.

На содержание феррита влияет пространственное положение при сварке

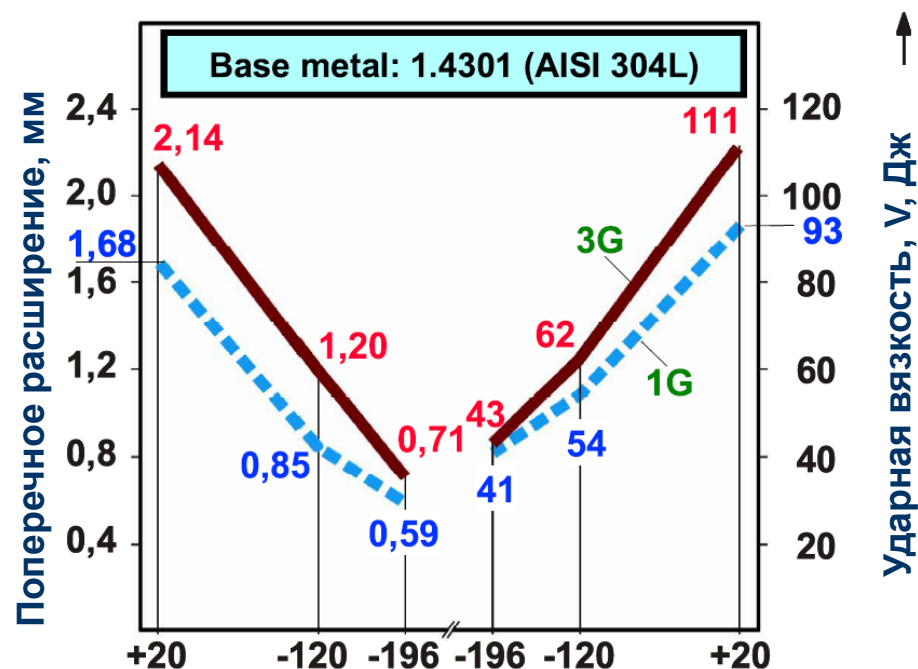
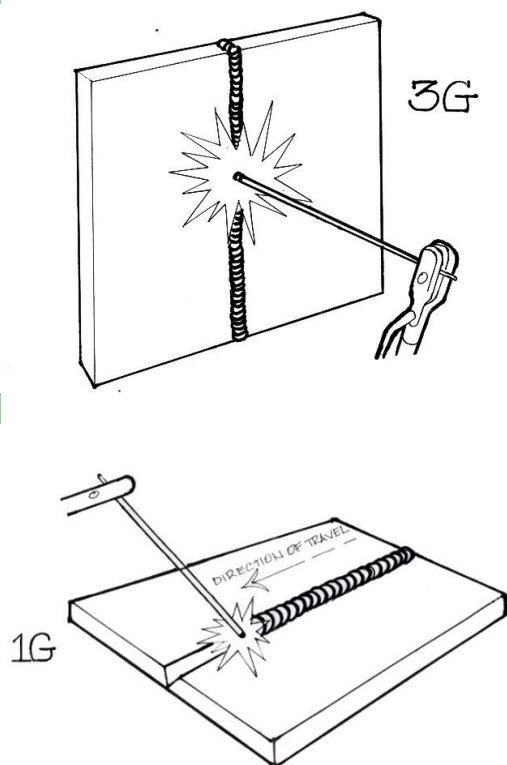


Рис. 7 Температура испытания, С

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Факторы влияющие на содержание ферритной фазы.

При планировании сварочной процедуры необходимо учитывать возникающие напряжения при кристаллизации металла сварного шва. Чем больше усадка, тем выше содержание ферритной фазы и тем ниже показатель ударной вязкости.

Сварка длиной дугой повышает содержание азота и понижает содержание легирующих элементов в наплавленном металле за счёт их выгорания. При сварке сварочными электродами типа AWS E 308L-15 при длине сварочной дуги 3 мм, содержание ферритной фазы было определено на уровне 3 FN, а при увеличении длины дуги до 8 мм содержание феррита в металле шва снижалось до 1 FN.

Существуют различия в содержаниях феррита полученными в результатах измерений и расчётных значений. Так же могут существовать различия между результатами, полученными в разных лабораториях

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.



Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Измерение содержания ферритной фазы.

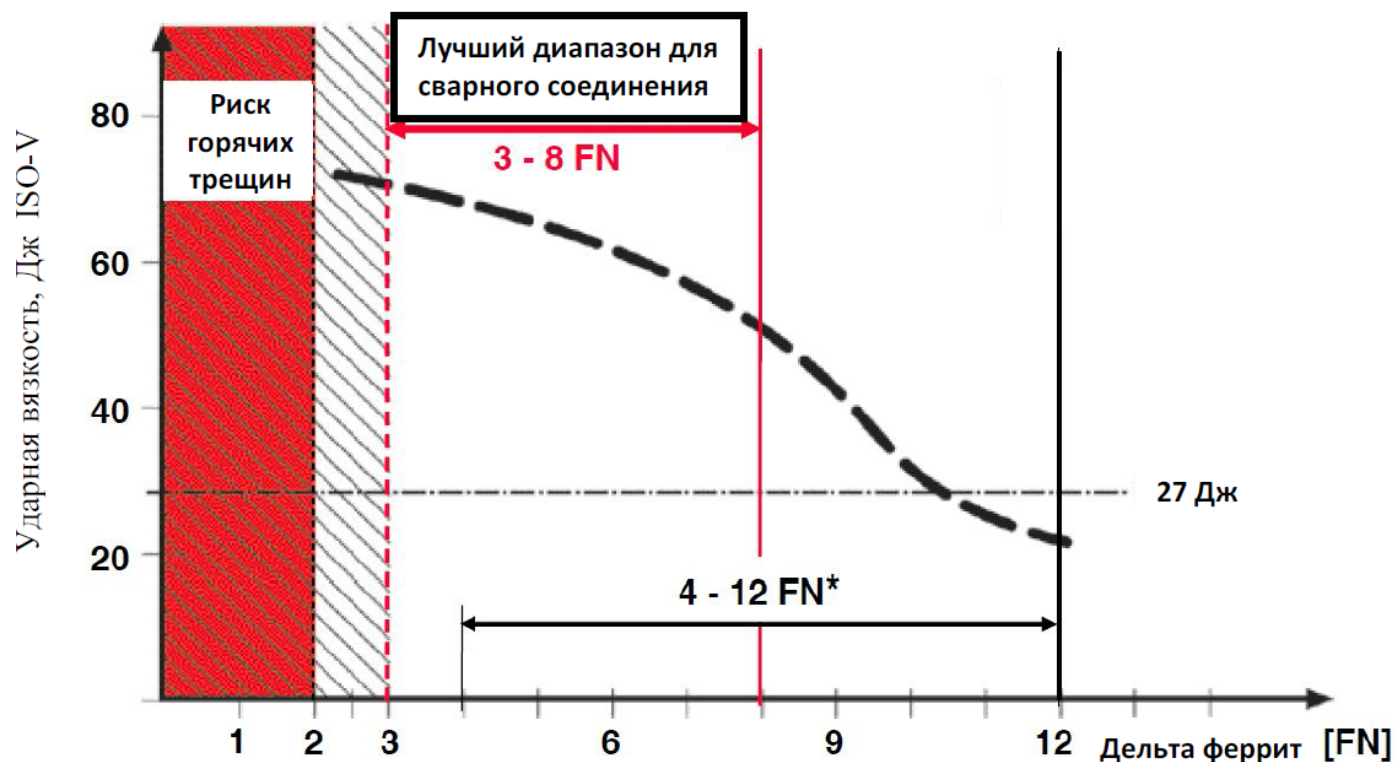


Рис.8 Зависимость ударной вязкости от содержания ферритной фазы в сварном соединении при - 196°C

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Измерение содержания ферритной фазы.

В настоящее время существуют два основных сформулированных конструкторских кода, которые обозначают требования по ударной вязкости:

ASME B31.3, piping code (трубный код). Требования кода фокусируются поперечном расширении и устанавливают минимально допустимое значение в **0,38 мм**.

VdTUV Information Sheet "Guidelines on suitability of welding filler metals" 1980, задаёт минимальное возможное значение ударной вязкости в **32 Дж**.

Эти значения в зависимости от применяемого кода и спецификаций конструкторов являются определяющими для выбора сварочного материала.

Поведение аустенитных сварных соединений при низких температурах.

Заключение

- Сварочные проволоки и прутки сплошного сечения для MIG и TIG сварки
- Порошковые проволоки и прутки для MIG и TIG (корневой проход без поддува) сварки
- Сварочные электроды основного типа
- Для получения надежных результатов сварки нержавеющей стали для конструкций, работающих при экстремально низких температурах, контроль значений ударной вязкости сварного соединения являются одним из важнейших моментов.
- Применение специализированных сварочных материалов, имеющих баланс химических элементов, обеспечивающих заданное содержание ферритной фазы, необходимо для достижения качества сварных соединений.