



## Упрочнение и управление остаточными напряжениями в сварных соединениях из низколегированной стали северного исполнения

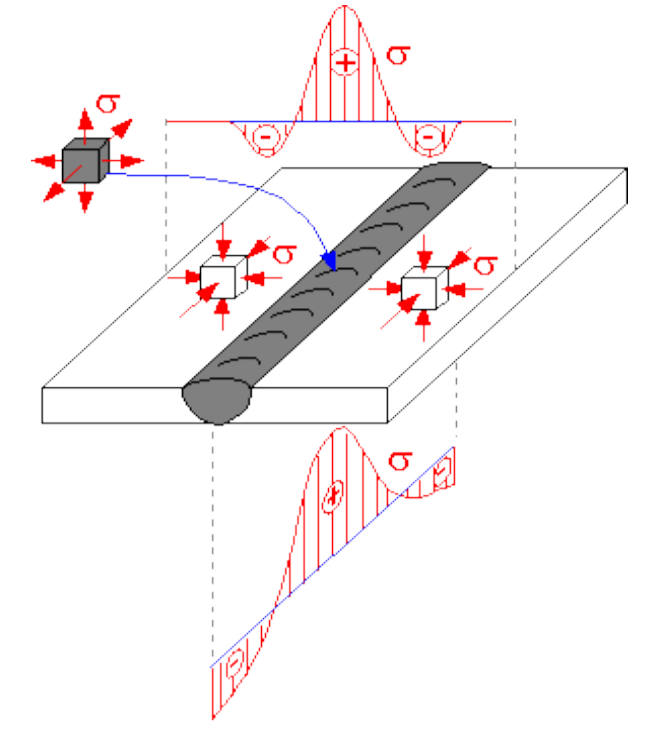
к.т.н. Сидоров М.М., аспирант Михайлов А.Ю.

Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск  
e-mail: sidorovmm@bk.ru

Развитие инфраструктуры в Арктике требует эксплуатации сварных конструкций при температурах до  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже. Сварка в условиях низких климатических температур приводит к значительному росту растягивающих остаточных сварочных напряжений (ОСН), снижающих усталостную долговечность и хладостойкость соединений. Традиционные методы (термический отпуск) часто энергозатратны или неприменимы в полевых условиях. Актуальным является научное обоснование эффективных методов, таких как ультразвуковая ударная обработка (УУО), для экстремальных условий.

**Цель работы** – научное обоснование применения УУО для управления остаточными напряжениями в поверхностном слое сварных соединений северного исполнения путём экспериментального исследования её эффективности при различных температурах сварки и режимах обработки.

**Методика исследований.** В рамках работы мы проводим системные исследования на стыковых соединениях из низколегированных сталей (к примеру, 10ХСНД), характерных для северного исполнения. Методология исследований включает **специально изготовленные образцы** методом ручной дуговой сварки (РДС) из сталей 10ХСНД-3 в комнатных и отрицательных температурах (полигоне). Анализ остаточных напряжений в поверхности ЗТВ сварных соединений портативным рентгеновским определителем напряжений (в продольном и поперечном направлении относительно шва). Механические испытания. Исследование влияния режимов, условий сварки (рис. 1) и обработки на формирование ОСН. Такой комплексный методологический подход позволяет не просто фиксировать изменения, а выявлять глубинные закономерности влияния УУО на свойства соединений.



Формирование ОСН

При комнатной температуре поперечные напряжения достигают 60 МПа, продольные — 148 МПа. Существенное увеличение уровня ОСН наблюдалось при сварке в условиях отрицательных температур: поперечные напряжения возросли до 160 МПа, а продольные — до 197 МПа, что демонстрирует выраженную зависимость уровня ОСН от температурных условий проведения сварки

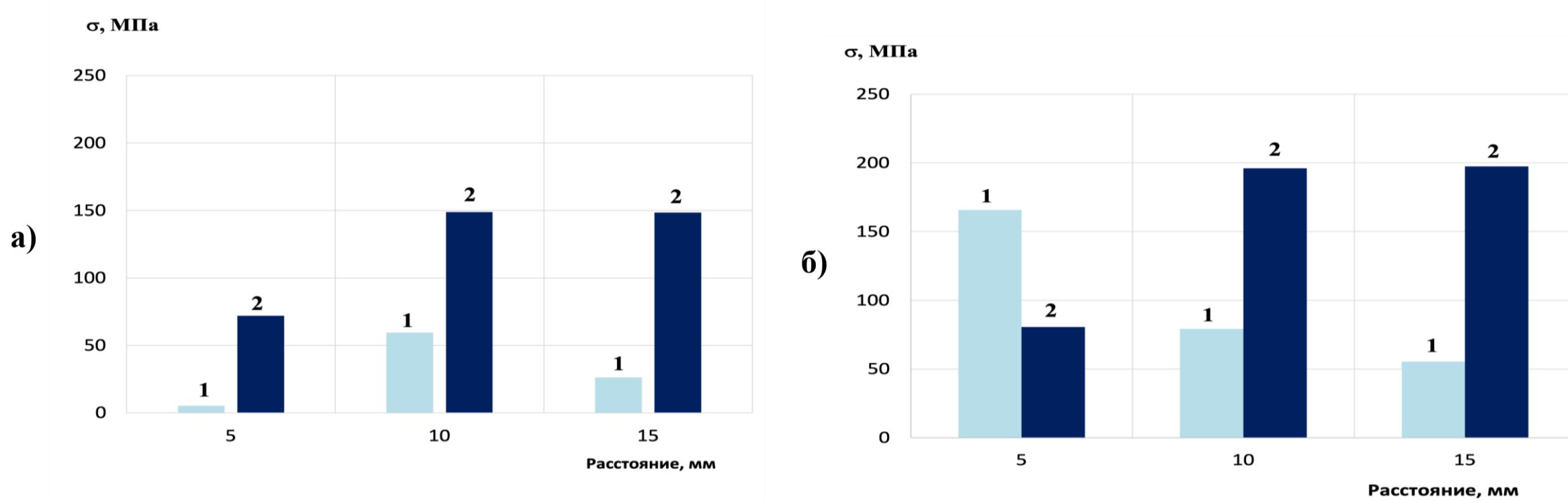


Рис. 1. Распределение ОСН в сварных соединениях пластин из стали 10ХСНД, выполненных сваркой при комнатной  $+20^{\circ}\text{C}$  (а) и отрицательной температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  (б):  
1. Поперечное напряжение 2. Продольные напряжения

Таблица 1. Механические свойства основного металла и сварного соединения, погонная энергия сварки

Образцы и температура сварки	Среднее значение механических свойств			Прочность сварки	Погонная энергия Q, кДж/см
	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %		
<b>Основной металл</b>					
Сталь 10ХСНД, толщина 14 мм, ширина 178 мм, длина 350 мм	610	480	31		
<b>Сварное соединение</b>					
Сварное соединение (при $-35^{\circ}\text{C}$ )	642	468	17,7	1	1027
				2	1185
				3 и 4	794
				5	1959
				1	1063
Сварное соединение (при $+20^{\circ}\text{C}$ )	664	479	17,9	2	1381
				3 и 4	680
				5	1734

УУО после сварки осуществляли с помощью технологического комплекса, состоящего из ультразвуковой генератор (УЗГТ 0.5/27) и технологической оснастки типа «Шмель»

Обрабатываемая поверхность (ОШЗ)	Время, частота и мощность		
	УУО-1	УУО-2	УУО-3
Длина участка 115 мм, ширина 20 мм от края шва	60 сек.	60 сек.	60 сек.
	22-25 кГц	22-25 кГц	22-25 кГц
	340 Вт	420 Вт	500 Вт

Послесварочную обработку осуществляли со стороны облицовочного слоя шва двумя способами. Температура окружающей среды при этом соответствовала температуре сварки. Первый способ применяли на одной стороне зоны термического влияния (ЗТВ) сразу после сварки, в горячем состоянии, при температуре металла  $160-230^{\circ}\text{C}$ . Второй способ применяли на другой стороне ЗТВ – после полного остывания соединения, спустя сутки (рис. 2).

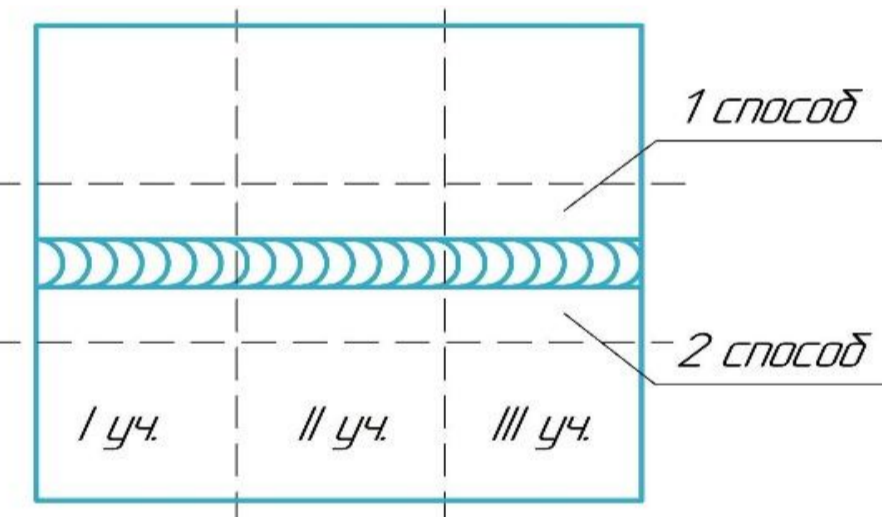
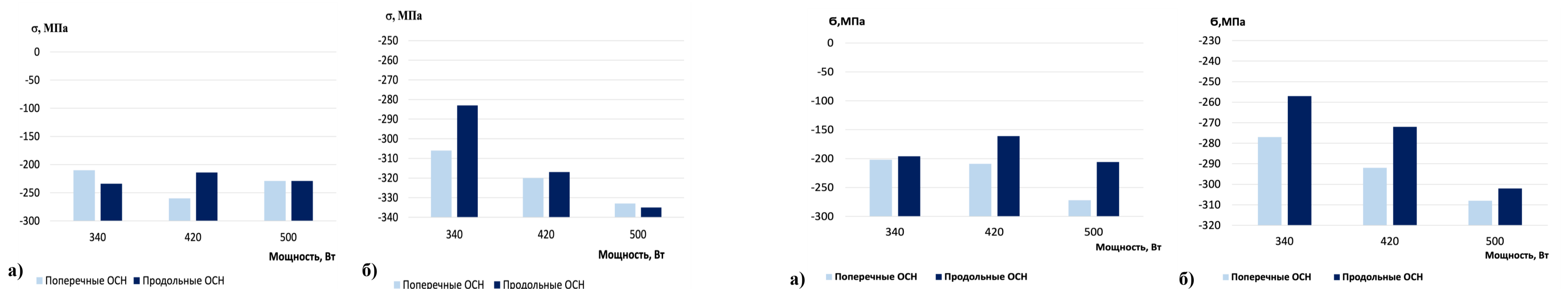


Рис. 2. Участки проведения УУО



Перераспределение ОСН в сварном соединении пластины из стали 10 ХСНД, выполненной сваркой при комнатной температуре и разных способах УУО:  
а) В горячем состоянии; б) После полного остывания

Перераспределение ОСН в сварном соединении пластины из стали 10ХСНД, выполненной сваркой при низкой климатической температуре и разных способах УУО:  
а) В горячем состоянии; б) После полного остывания.

Экспериментально исследована эффективность УУО для трансформации остаточных сварочных напряжений в зоне термического влияния сварных соединений из стали 10ХСНД-3, выполненных при комнатной и отрицательной температуре окружающего воздуха. Показано, что УУО (26 кГц, 340–500 Вт) во всех режимах обеспечивает полную трансформацию растягивающих напряжений в сжимающие. Наиболее высокий уровень сжимающих напряжений (до  $-337$  МПа при комнатной сварке и до  $-308$  МПа при низкотемпературной) достигается при обработке после полного остывания соединения. Полученные результаты создают научную основу для целенаправленного формирования сжимающих полей остаточных напряжений в диапазоне  $-250...-340$  МПа и обосновывают выбор УУО в качестве энергоэффективной альтернативы термообработке для повышения долговечности сварных конструкций в экстремальных климатических условиях.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта FWRS-2024-0034 и с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН

Уважаемые коллеги из Института машиноведения имени Э.С. Горкунова!

Авторы доклада сердечно поздравляет вас с 40-летием вашего института.

Для нас большая честь участвовать в вашей конференции, хоть и заочно. Пользуясь случаем, желаем вам дальнейших успехов и новых научных побед. Надеемся, что наше первое знакомство перерастет в долгое и взаимовыгодное сотрудничество. С праздником!