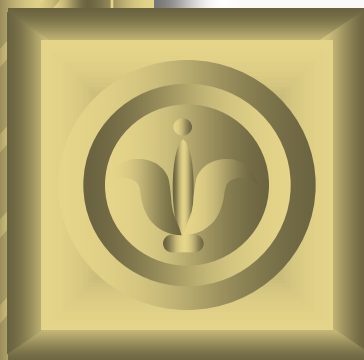


Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск;
ООО «Эллой», г. Нижний Новгород; ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург;
Институт физико-технических проблем им В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ ИНВЕРТОРНОГО ТИПА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР*

Ю.Н.Сараев, М.С.Сорокин, С.В. Гладковский, Н.И. Голиков.

**Исследования проводятся в соответствии с целями и задачами проекта
РНФ №16-19-10010*

VII-е Отраслевое совещание «Состояние и основные направления развития сварочного
производства ПАО «ГАЗПРОМ», п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 15-18 ноября 2016 года

Актуальность

В связи с интенсивным освоением территорий, расположенных в регионах Сибири, Крайнего Севера и Арктики возникает настоятельная необходимость совершенствования технологий сварки и наплавки, как основных технологических процессов, применяемых при производстве и ремонте крупно-габаритных металлоконструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур: нефте- и газопроводы, резервуары, судовая, автомобильная, строительно-дорожная и карьерная техника, оборудование объектов энергетики, связи, железно-дорожной инфраструктуры.

Пути решения проблемы

Одним из наиболее перспективных путей, позволяющим обеспечить равнопрочность металлоконструкции в целом, является применение для её изготовления технологических процессов на основе высококонцентрированных потоков энергии, которые вследствие быстрого нагрева зоны соединения и такого же быстрого ее охлаждения способствуют минимальным структурным изменениям, а, следовательно, и минимальным напряжениям и деформациям. Наиболее полно сформулированным требованиям отвечают импульсные технологические процессы сварки, которые в последнее время находят все большее применение в практике мирового промышленного производства.

Цель проводимых исследований:

**Изыскание наиболее
эффективных направлений
повышения ресурса, живучести и
эксплуатационной надежности
технических систем со сварными
соединениями и наплавленными
покрытиями посредством
управления быстропротекающими
процессами тепломассопереноса в
условиях низких климатических
температур.**

Для достижения сформулированной цели необходимо решение трех взаимосвязанных задач:

- Разработка и практическое применение нового поколения сварочных и наплавочных материалов, имеющих в своей структуре субмикrokристаллические и нано-размерные компоненты, оказывающие модифицирующее влияние на зону неразъемного соединения.
- Разработка и практическое применение новых методов диагностики быстропротекающих процессов тепломассопереноса, сопровождающих плавление, перенос и кристаллизацию металла шва из расплава, оказывающих доминирующее влияние на напряженно-деформируемое состояние конструкций ответственного назначения.
- Разработка и практическое применение нового поколения источников питания, обладающих высокими динамическими свойствами и реализующих алгоритмы адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима, в том числе в условиях низких климатических температур (вплоть до $-40 - 50^{\circ}\text{C}$).

- **Разработка и практическое применение нового поколения сварочных и наплавочных материалов**

На рубеже XX и XXI веков эту фундаментальную задачу в США и Канаде, странах Европейского Союза, России, Китае и странах СНГ начинают решать путем применения в составе присадочных материалов химических соединений, содержащих твердые сплавы, твердые растворы, в т. ч. алюминия, кремния, циркония, а также порошки тугоплавких соединений на основе хрома, титана, никеля и т. д.), которые под действием импульсных высококонцентрированных энергетических потоков с малой длительностью пульсации способны активировать процессы структурно-фазовых и химико-термических превращений, обеспечивающих повышение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий.

- **Разработка и практическое применение новых методов диагностики быстропротекающих процессов тепломассопереноса, сопровождающих плавление, перенос и кристаллизацию металла шва из расплава**

Суть второй решаемой задачи заключается в том, что:

До настоящего времени остаются малоизученными процессы тепломассопереноса, протекающие в сложной электродинамической системе источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие при различных способах сварки, в том числе с импульсным изменением энергетических параметров режима в частотном диапазоне от 0.25 – 300 Гц.

Изучение таких быстропротекающих процессов связано с применением специальной регистрирующей техники, которая должна обеспечивать синхронную регистрацию энергетических параметров режима с характеристиками массопереноса электродного металла на этапе его плавления.

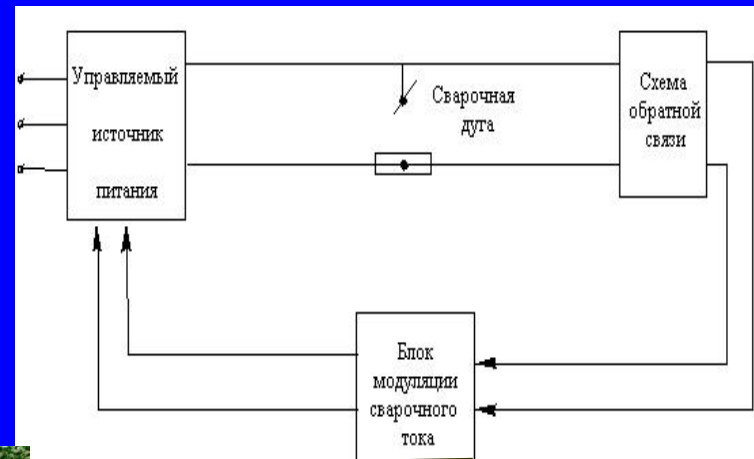
Суть второй решаемой задачи

Исследования подобных быстропротекающих процессов, сопряжены с определенными трудностями, связанными со скоростью протекания процессов тепломассопереноса при одновременном действии мощного светового излучения сварочной дуги. Вместе с тем в настоящее время удастся преодолеть обозначенные трудности путем применения в составе создаваемых диагностических комплексов специальных импульсных CuBr-лазереров.

Особенностям работы таких диагностических комплексов будет посвящен отдельный доклад, предусмотренный программой работы настоящего Совещания.

- **Разработка и практическое применение нового поколения источников питания**

Суть третьей решаемой задачи связана с необходимостью создания новых источников импульсной энергии для: импульсно-дуговых, импульсно-плазменных, импульсно-лазерных, а также высокоскоростных газопламенных, электроконтактных, детонационных, которые были бы способны создавать направленные высококонцентрированные энергетические потоки с малой длительностью пульсации и использующих в своих структурах системы адаптивного управления для стабилизации рабочих характеристик.

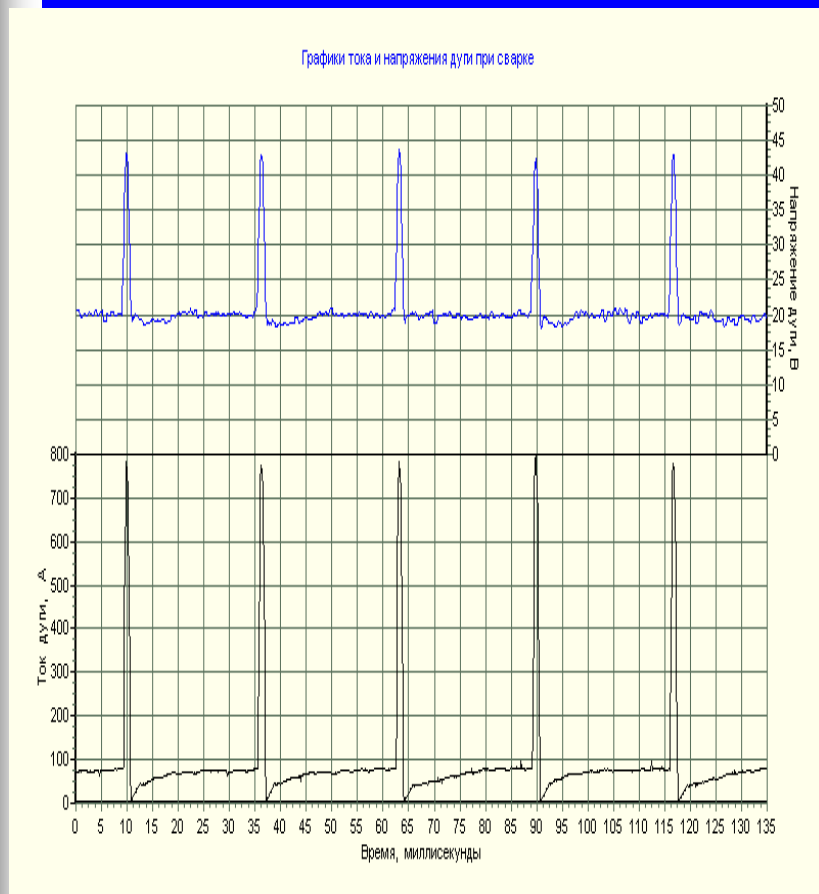


Комплект УДИ-205 и ВД-306Э



STRUNA

Адаптивная импульсно-дуговая сварка порошковой проволокой «длинной» дугой

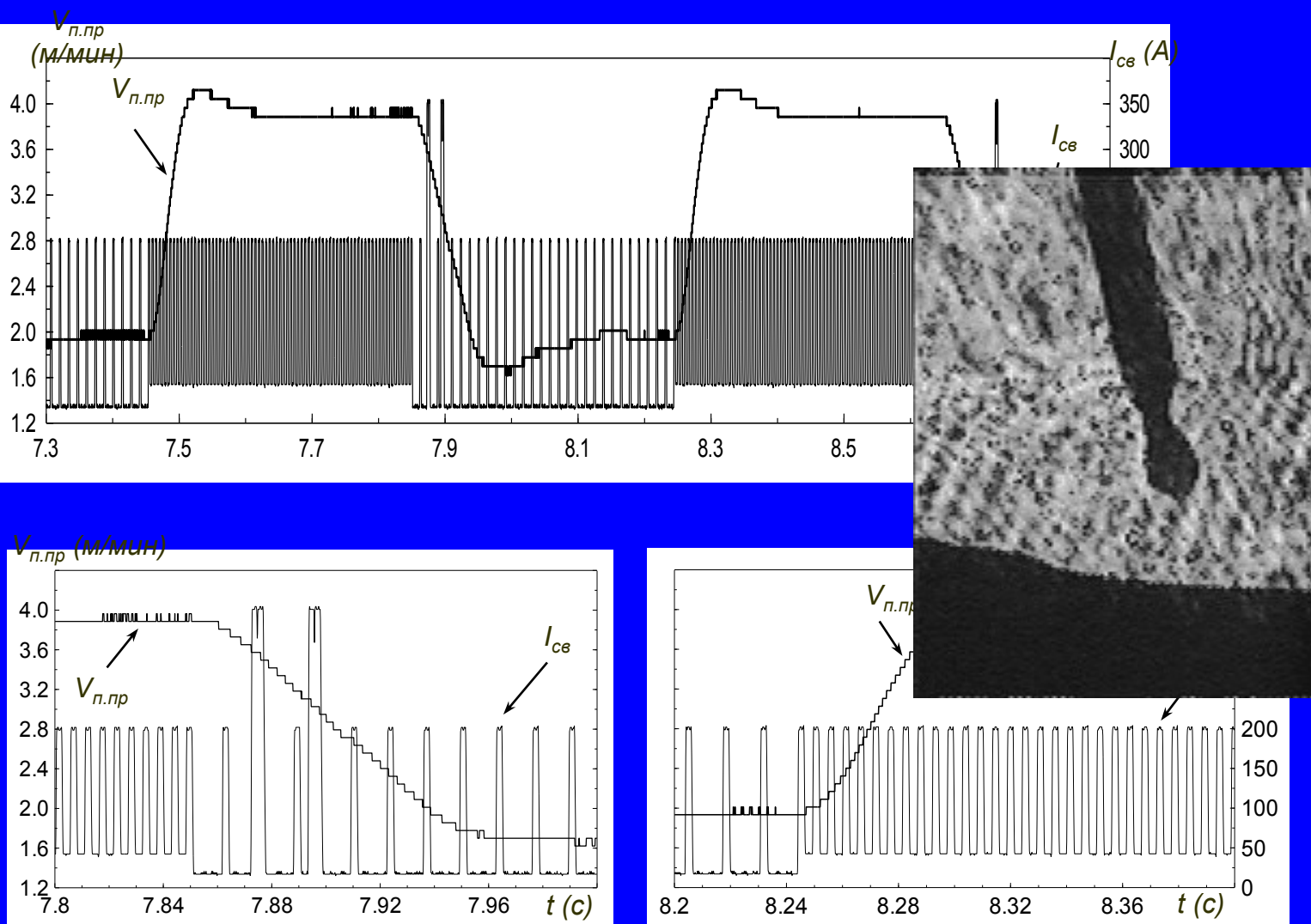


Осциллограммы напряжения и тока при импульсно-дуговой сварке «длинной» дугой.



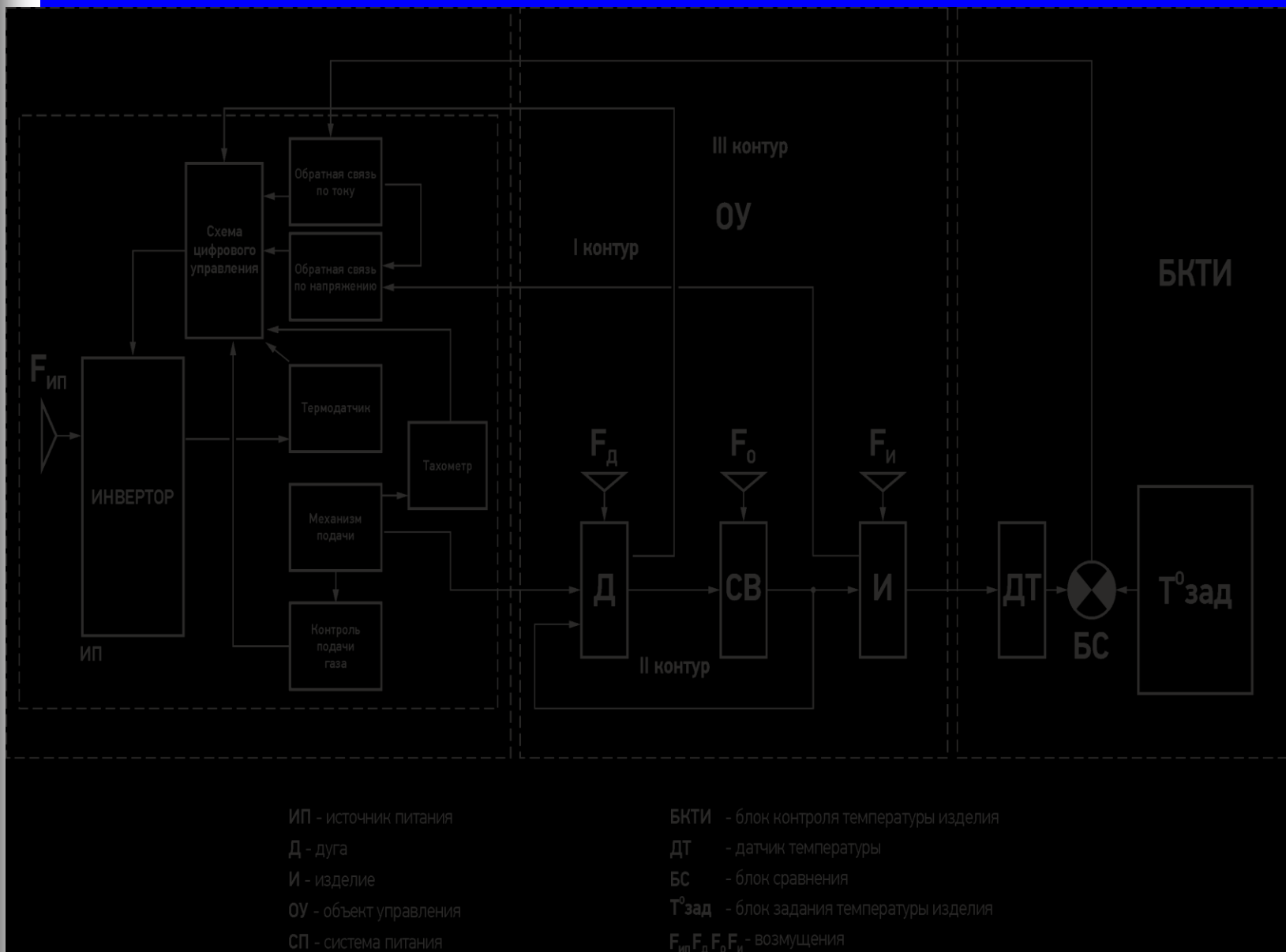
Скоростная киносъемка процесса импульсно-дуговой сварки порошковой проволокой «длинной» дугой. Скорость съемки 5000 кадр./сек

Процесс ИДС пачками импульсов

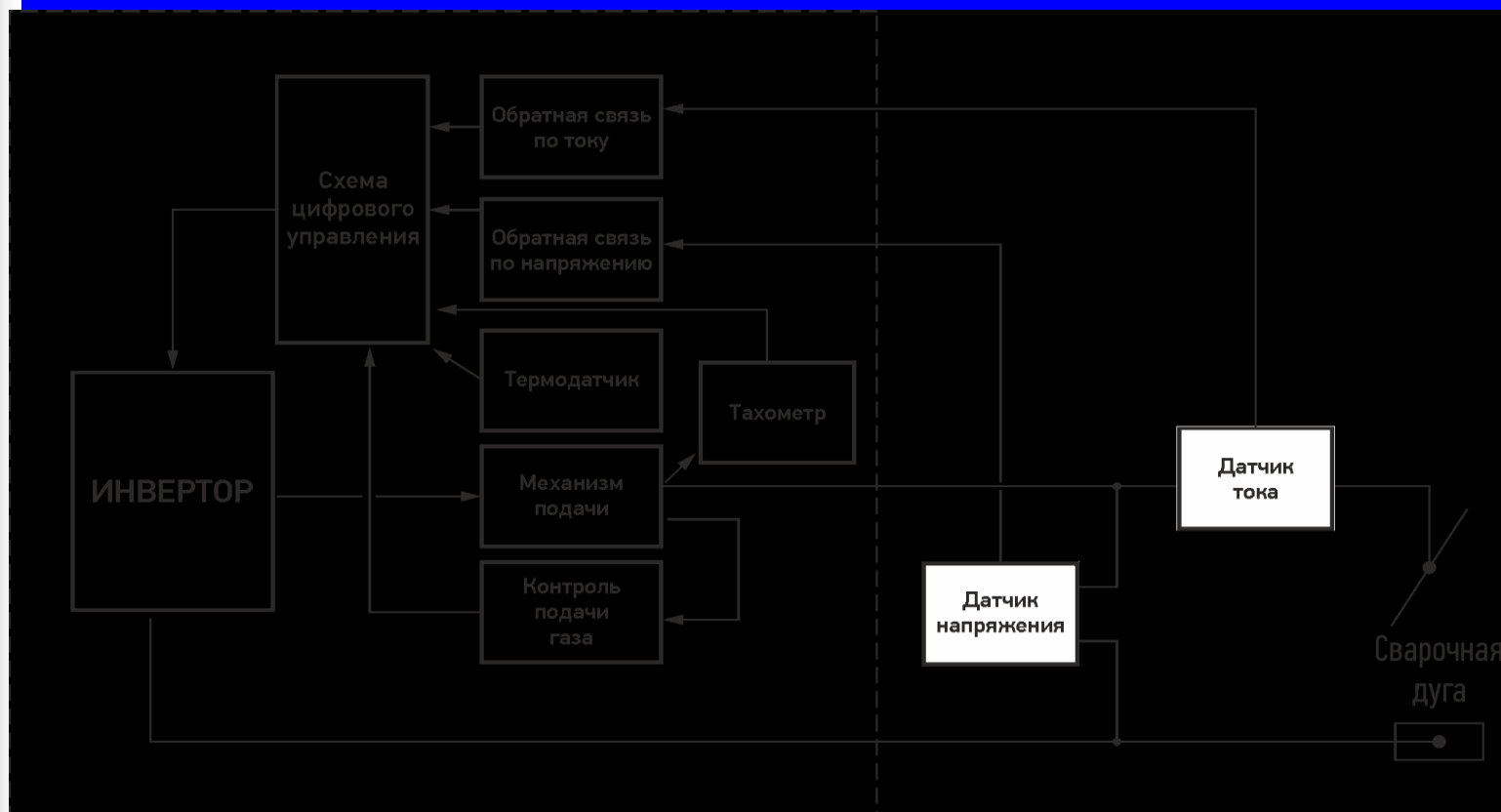


**Реализации адаптивных импульсных
технологических процессов в
современных источниках питания
инверторного типа**

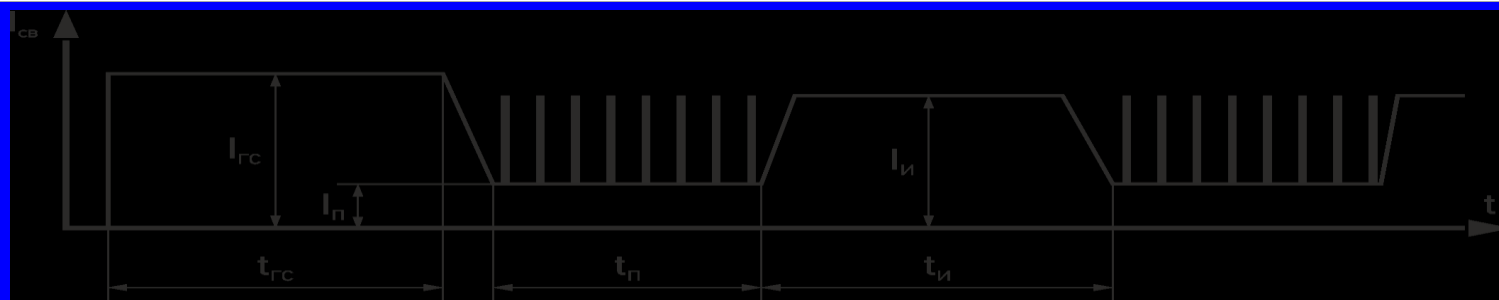
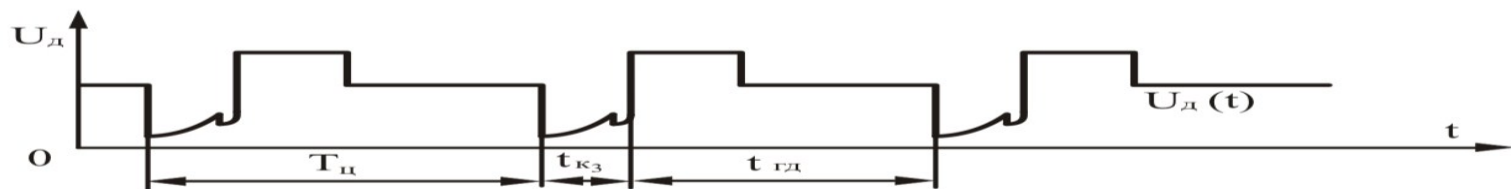
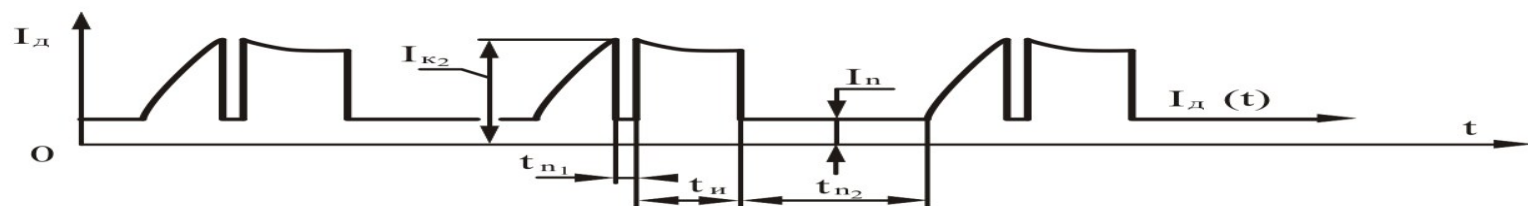
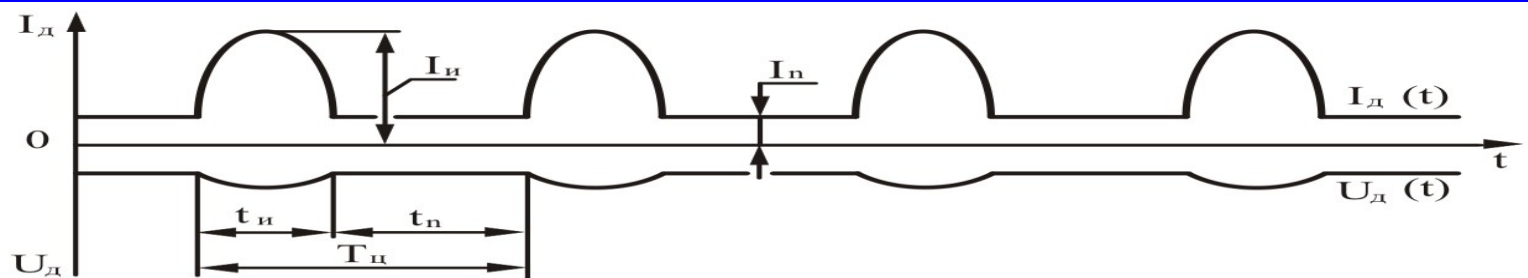
Блок-схема адаптивной системы автоматического регулирования технологическим процессом сварки



Разработка и практическое применение нового поколения сварочного оборудования

**MC-500MX****MC-501**

Алгоритмы адаптивного импульсного управления энергетическими показателями режима сварки



$I_{гс}$ - ток «горячего старта»

$I_{п}$ - ток паузы

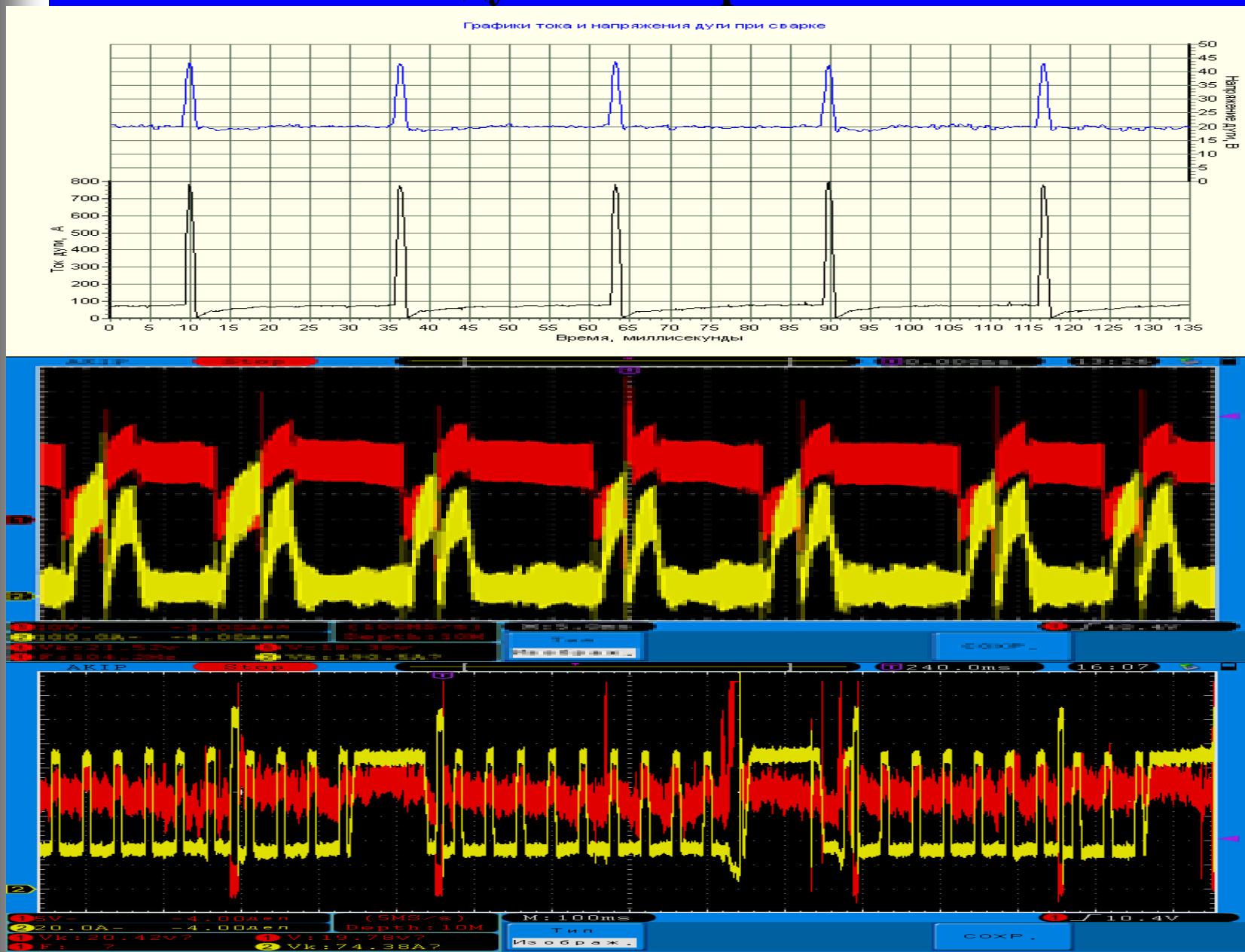
$I_{и}$ - ток импульса

$t_{гс}$ - время «горячего старта»

$t_{п}$ - время паузы

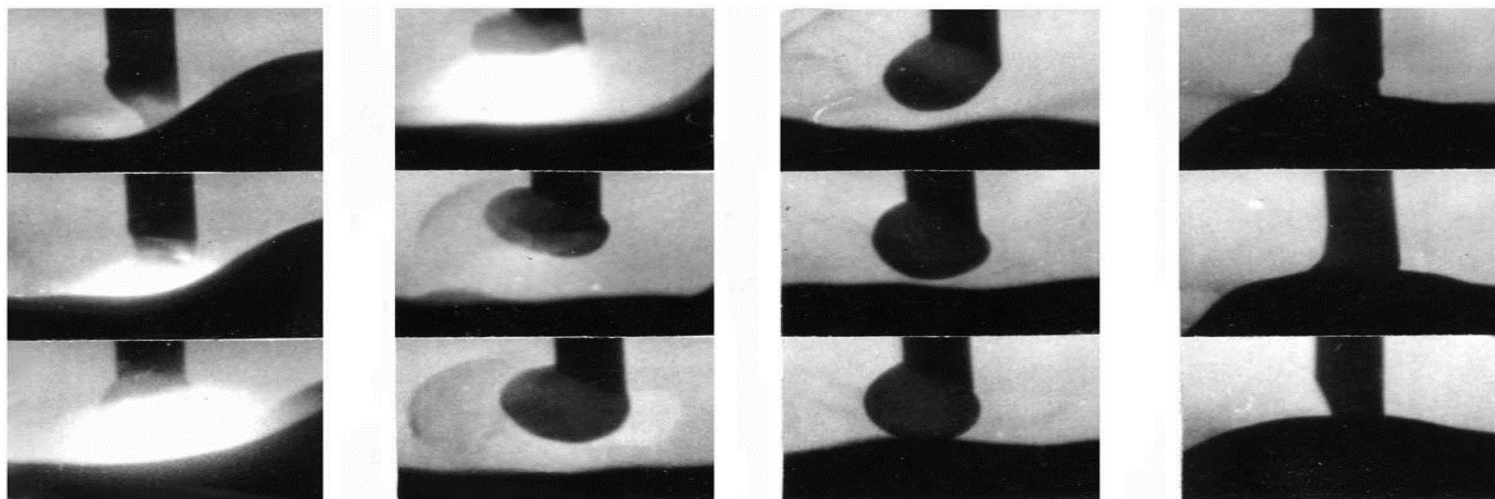
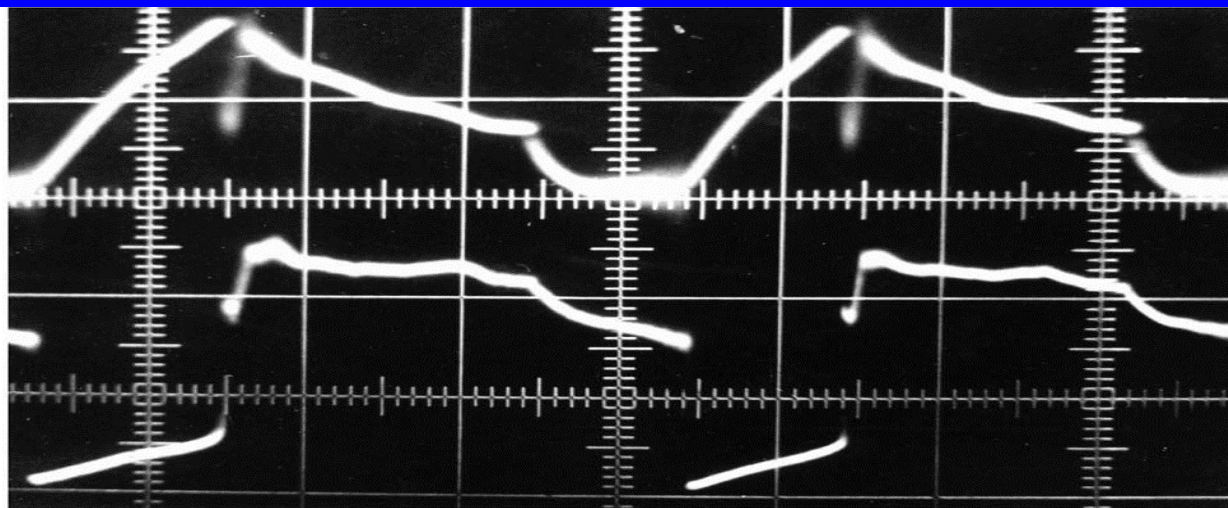
$t_{и}$ - время импульса

Осциллограммы способов адаптивной импульсно-дуговой сварки

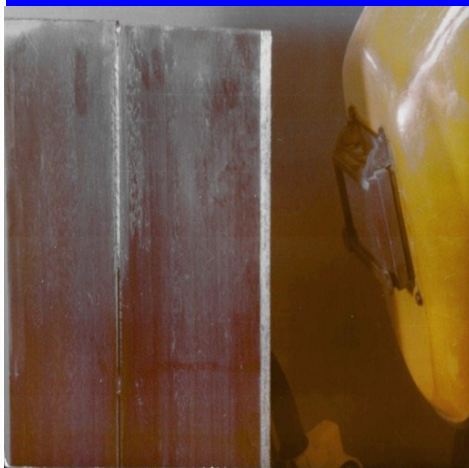


Практическая реализация адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки

Осциллограммы тока и напряжения адаптивной импульсно-дуговой сварки «короткой дугой» (а), кинограммы плавления и переноса электродного металла в течение сварочного микроцикла АРТ технологии в среде CO_2 (b)



Процесс АРТ при сварке корневого шва в среде CO_2 «короткой» дугой с формированием обратного валика методом «сверху-вниз»



Климатические испытания сварочного оборудования в Якутске

Источник питания
Master MLS™ 3500



Общая фотография участников климатических испытаний сварочного оборудования

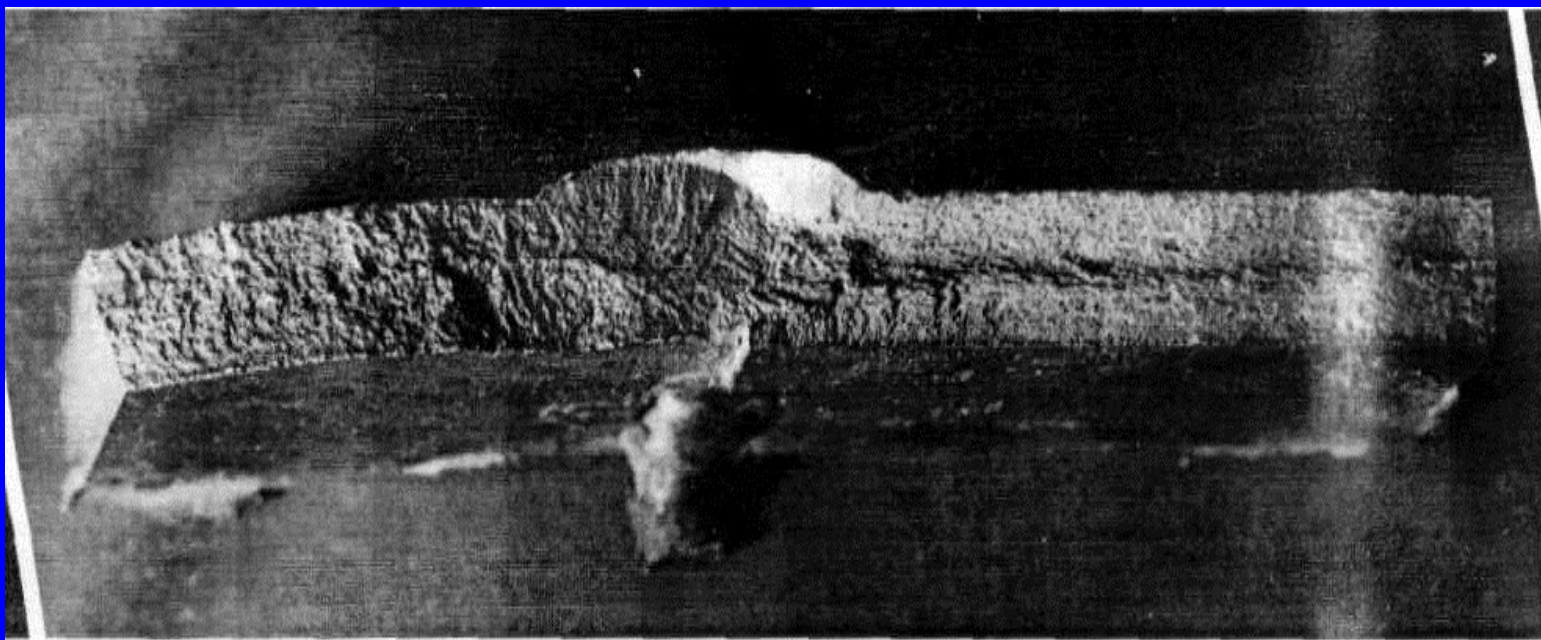


Структура, функциональные и механические характеристики сварных соединений

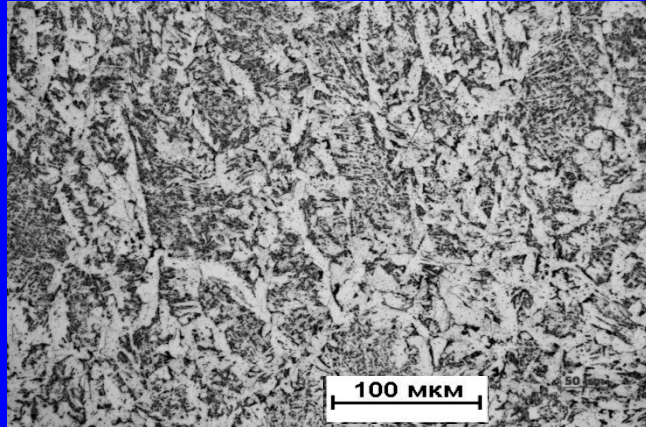
Разрушение магистральной трубы вдоль заводского стыка



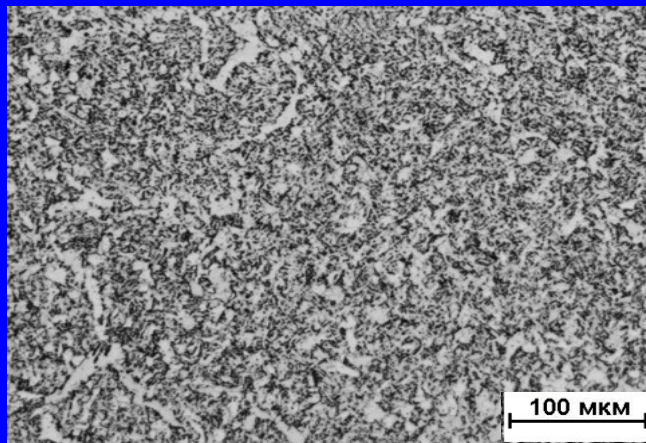
**Общий вид излома очага усталостного
разрушения магистрального газопровода
Берге - Якутск**



Структура сварных соединений сталей 17Г1СУ и 10Г2С при различных режимах сварки

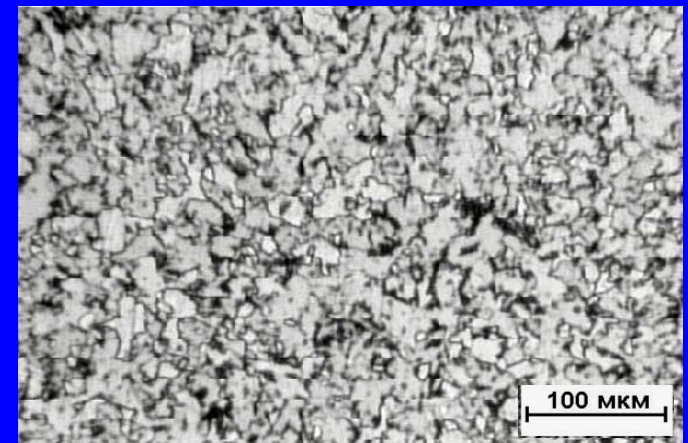
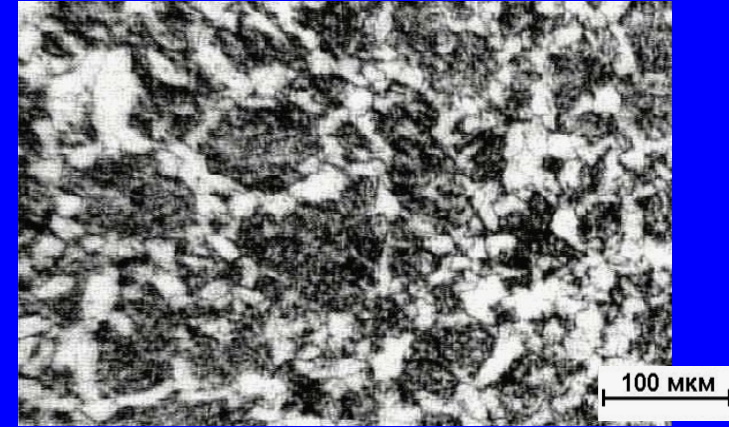


а



б

Структура металла шва в облицовочном слое сварного соединения стали 17Г1СУ после стационарного (а) и импульсного (б) режимов сварки



Структура металла шва в заполняющем слое сварного соединения стали 10Г2С при стационарном (а) и импульсном (б) режимах сварки.

Макроструктура сварных соединений, выполненных в стационарном и импульсных режимах



Сталь 17Г1С1У,
электрод ОК 53.70
Стационарный
режим



Сталь 17Г1С1У,
электрод ОК 53.70 .
Импульсный
режим, $f = 2$ Гц



Сталь 17Г1С1У,
электрод ОК 53.70 .
Импульсный
режим, $f = 5$ Гц

Результаты усталостных испытаний

Усталостная трещина в сварном соединении, образовавшаяся при испытаниях при температуре испытаний -40°C



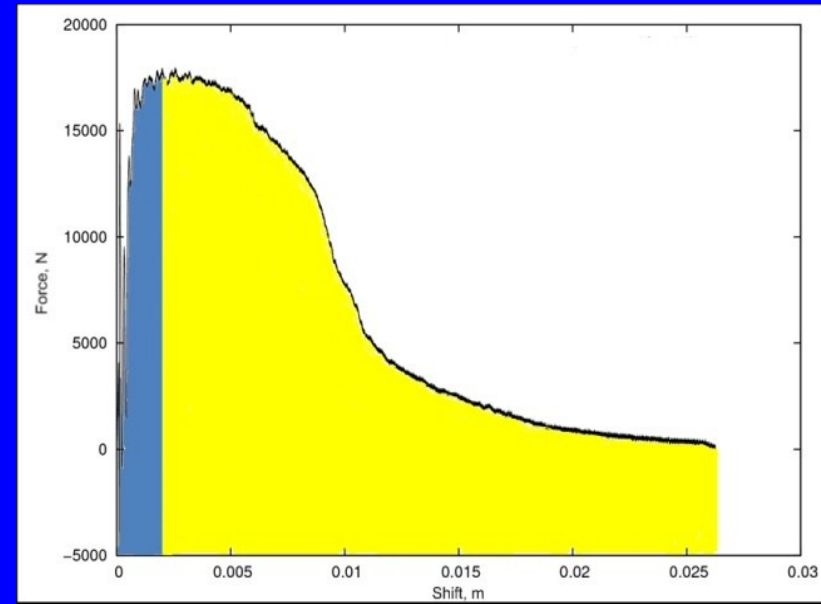
а)



б)

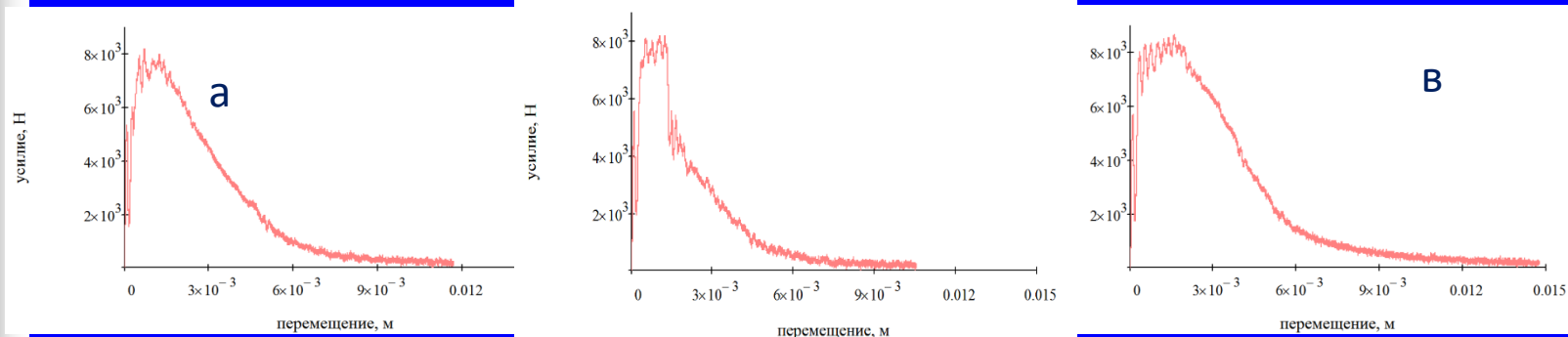
Фотографии мест изломов образцов сварных соединений после циклических испытаний при комнатной температуре (а) и отрицательной температуре -40°C (б)

M



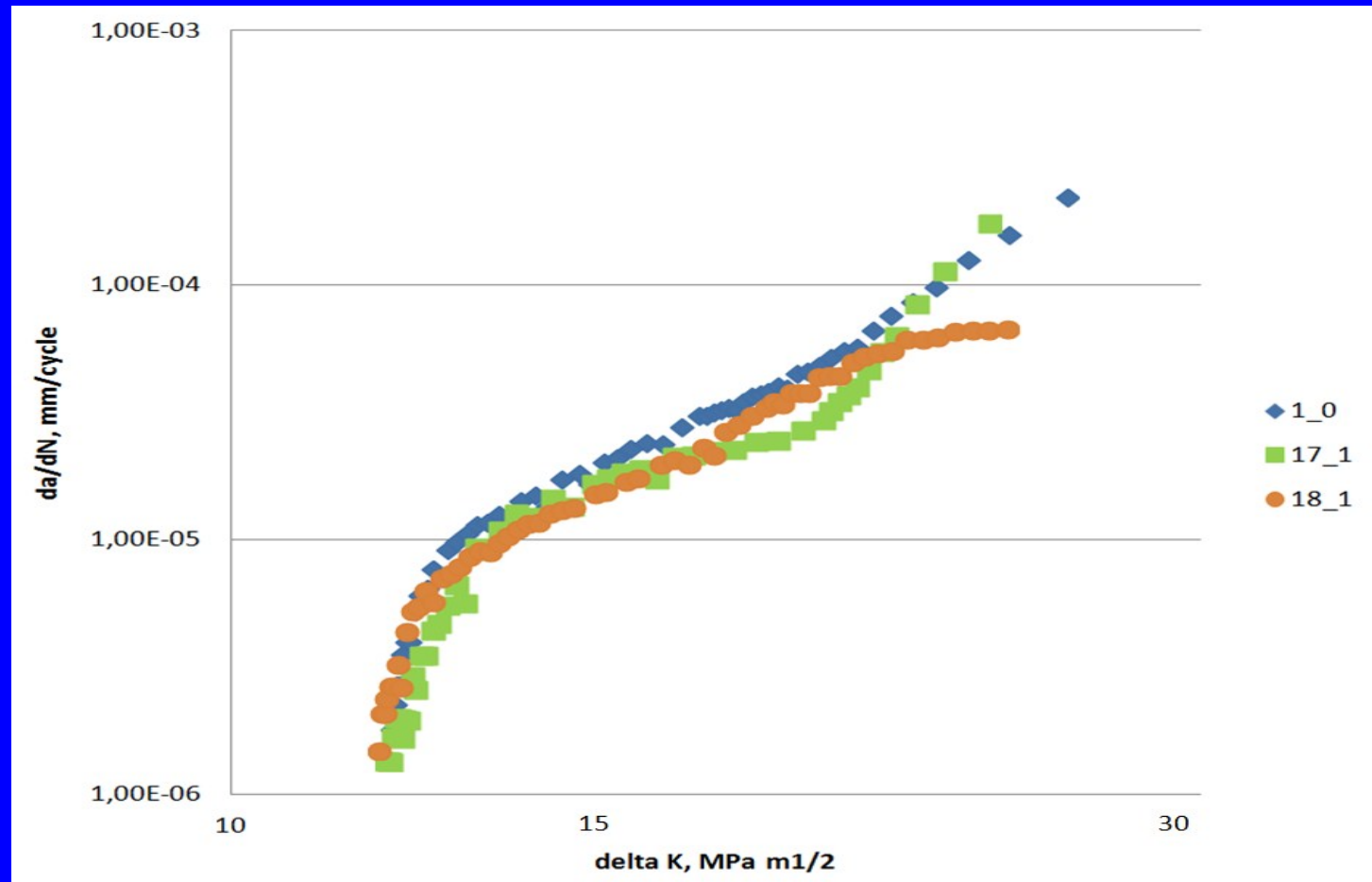
УДАРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С

Материал (№ обр.)	Т исп , °С	KCV, МДж/м 2	A з , Дж	A p , Дж	A p /A з	J id , МДж/м 2
Основной металл	20	0,85	6,86	24,74	3,61	0,37
	-60	0,65	6,60	19,66	2,98	0,33
ОШЗ /№ 17	20	1,01	6,83	32,29	4,73	0,35
	-60	0,47	6,10	12,74	2,09	0,26
ОШЗ /№ 18	20	0,86	9,00	24,86	2,76	0,46
	-60	0,82	10,25	22,89	2,22	0,51



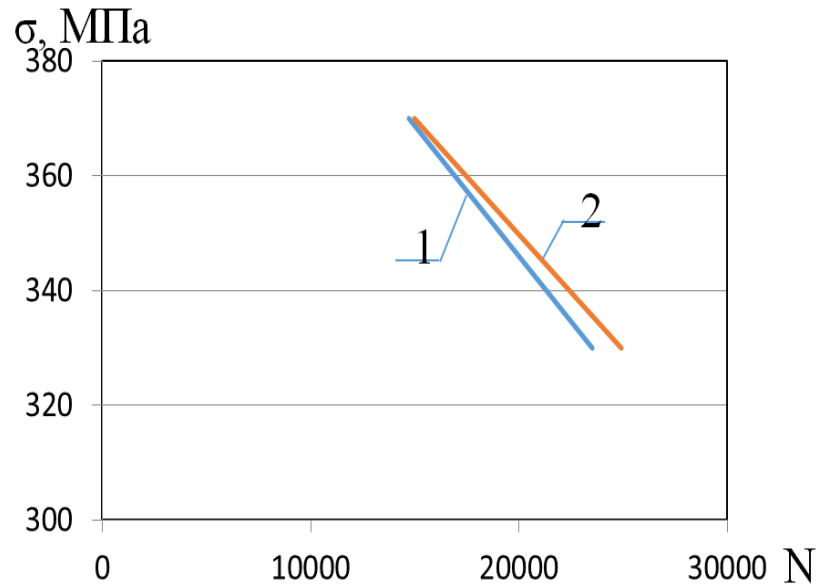
Диаграммы ударного нагружения образцов из основного металла (ОМ) и
околошовной зоны (ОШЗ) при температуре -60°С
а – основной металл (ОМ); б – ОШЗ /№ 17; в - ОШЗ /№ 18;

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С

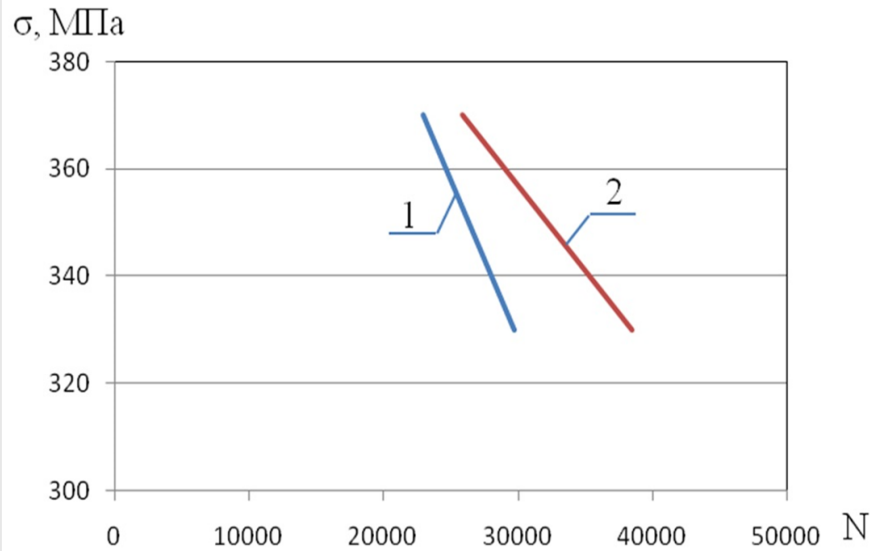


Кинетическая диаграмма усталостного разрушения в координатах "скорость роста усталостной трещины—размах коэффициента интенсивности напряжений" для образцов 1-0 (основной металл), 17-1 ОШЗ - СПТ) и 18-1 (ОШЗ - СМТ)

Результаты усталостных испытаний

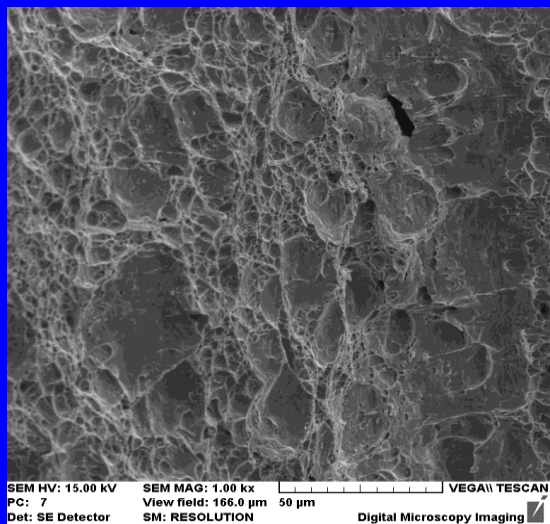


Усталостные линии металла шва сварных соединений из стали 09Г2С после испытаний при комнатной температуре:
1 - СРТ; 2 – СМТ

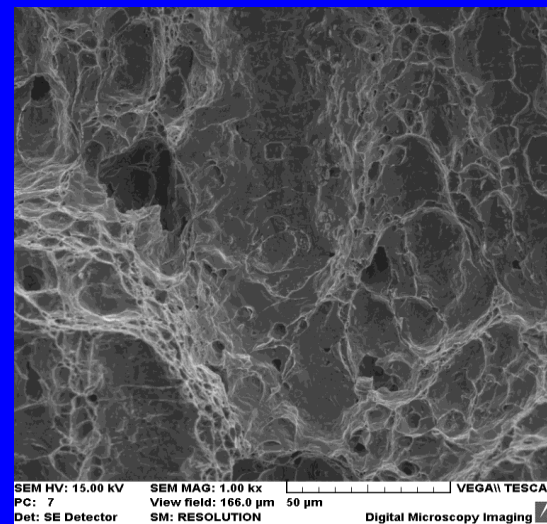


Усталостные линии металла шва сварных соединений после испытаний при комнатной температуре -40 °C:
1 - СРТ; 2 - СМТ

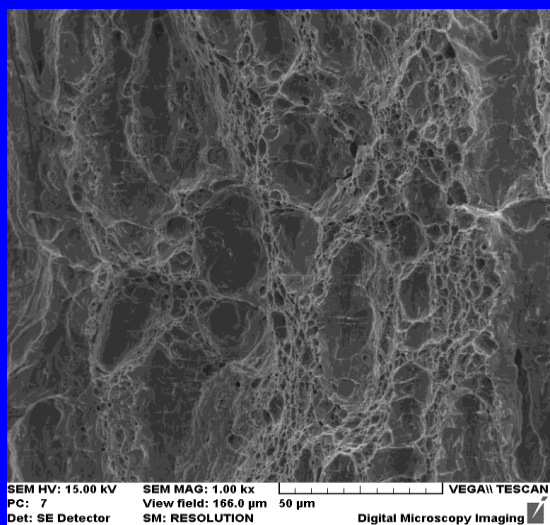
Фрактограммы изломов образцов после испытания при температуре 20 °С, ОШЗ



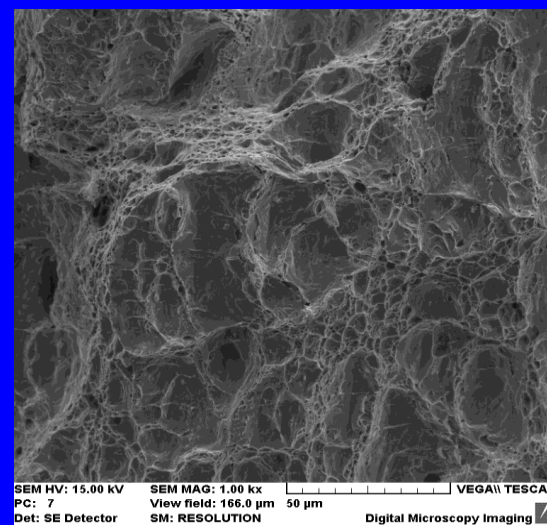
а) образец №1



б) образец №4

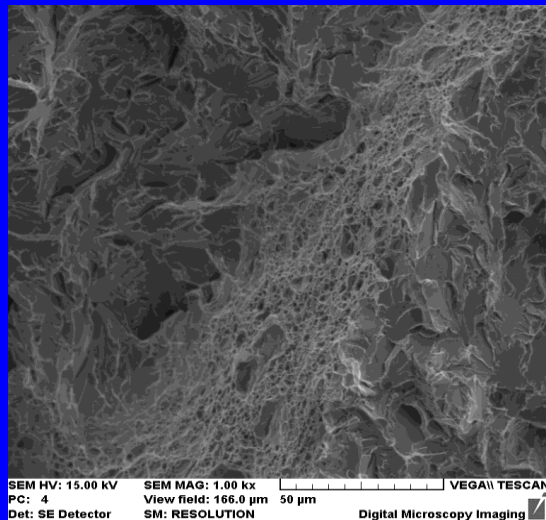


в) образец № 17

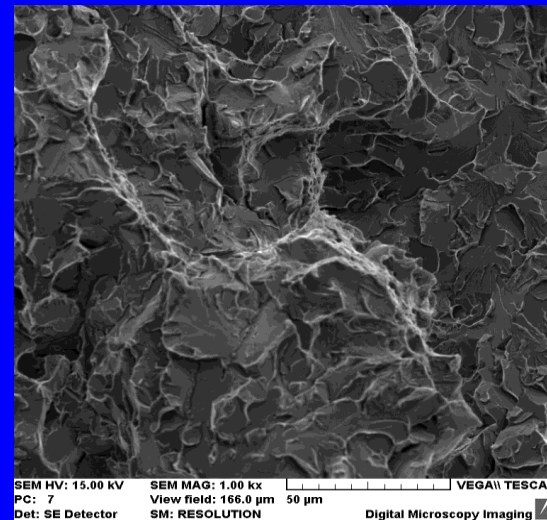


г) образец № 18

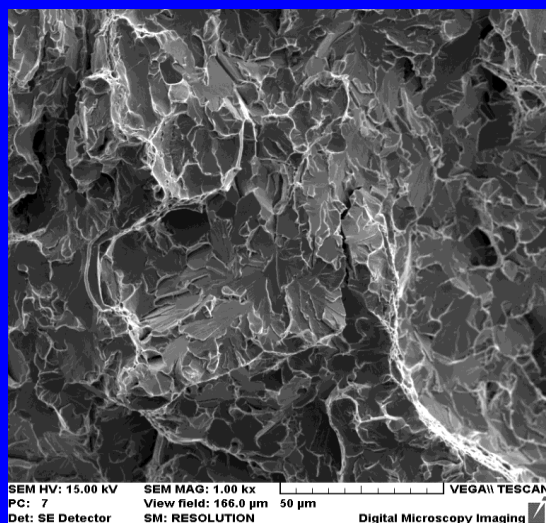
Фрактограммы изломов образцов после испытания на удар при температуре -60°C



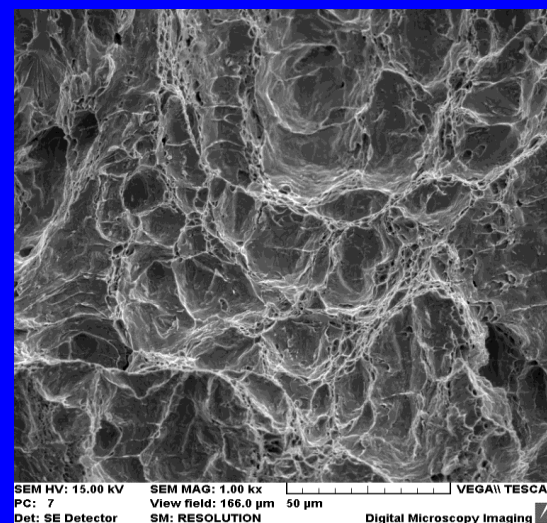
а) образец №1



б) образец №4

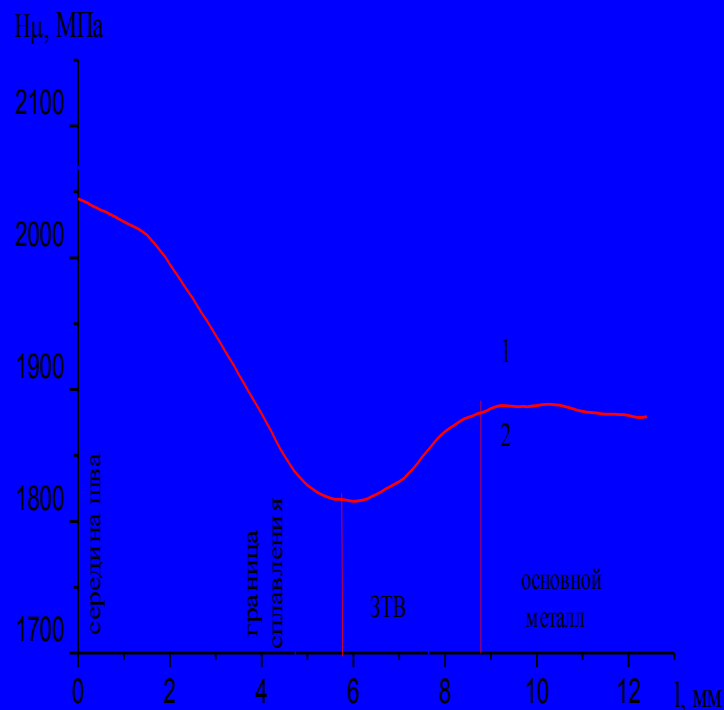


в) образец №17

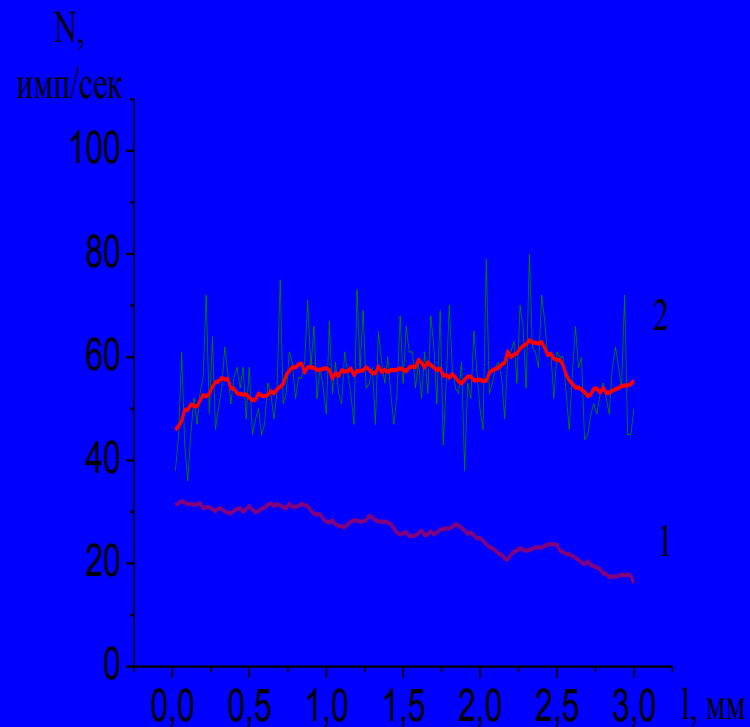


г) образец №18

Микротвердость в зоне сварного соединения стали 17Г1СУ



Распределение микротвердости в зоне сварного соединения стали 17Г1СУ, полученные при стационарном (1) и импульсном (2) режимах сварки.

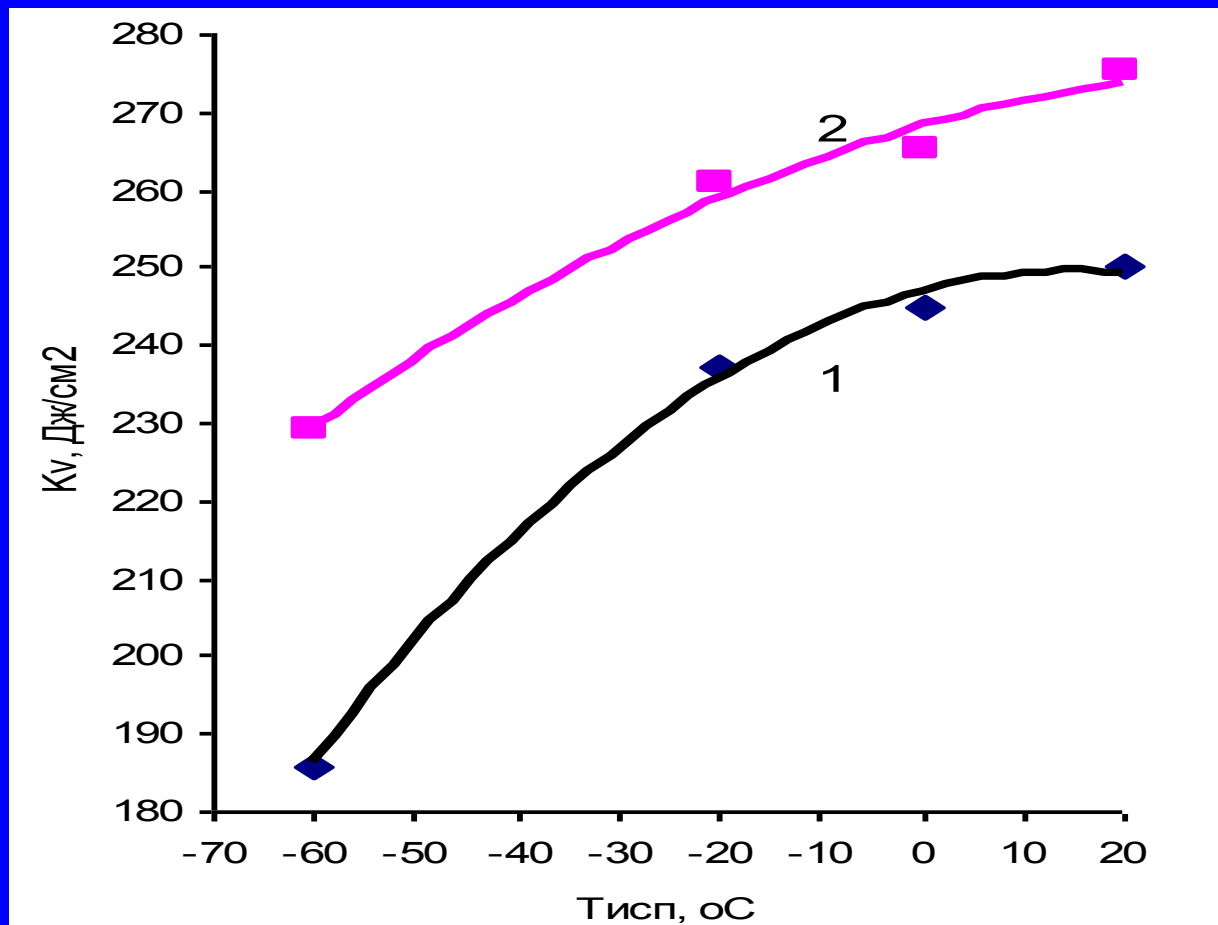


Распределение марганца в заполняющем слое шва сварного соединения стали 17Г1СУ после стационарного (1) и импульсного (2) режимов сварки

Ударная вязкость сварного соединения стали 17Г1СУ

Электроды	Режим сварки	ШОВ		ЗТВ	
		Kv ²⁰ Дж/см ²	Kv ⁻⁶⁰ Дж/см ²	Kv ²⁰ Дж/см ²	Kv ⁻⁶⁰ Дж/см ²
ОК	Стационарный	140,1	40,0	248,8	105,0
	Импульсный	150,3	50,0	270,0	188,8
	Увеличение, %	7	25	9,2	80
Kessel	Стационарный	130,0	41,3	240,0	165,0
	Импульсный	140,0	51,3	252,0	254,0
	Увеличение, %	7,2	24	4,8	53

Влияние температуры испытания на ударную вязкость сварного соединения стали 10Г2С



Зависимость ударной вязкости сварных соединений от температуры испытания при стационарном (1) и импульсном (2) режимах сварки электродами ОК

Усталостная прочность металлов шва и ЗТВ сварных соединений стали 17Г1СУ

Тип электрода	Зона сварного соединения	Число циклов до разрушения, ×10 ⁴		Увеличение усталостной прочности, %
		Режим сварки		
		стационарный	импульсный	
ОК 74.70	Шов	7,03	12,2	73
	ЗТВ	7,95	11,5	40
УОНИ 13/55	ЗТВ	4,2	5,09	21

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России создано и успешно развивается перспективное направление по разработке и практическому применению методов АРТ, которые можно эффективно применять при строительстве и ремонте крупногабаритных металло-конструкций ответственного назначения.

Повышение эксплуатационных показателей технических систем ответственного назначения в условиях низких климатических температур и экстремальных условиях, характеризующихся повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред, циклическим воздействием внешних и внутренних факторов, обусловленных повышенным перепадом температур, атмосферного, гидростатического и гидравлического давлений, является фундаментальной задачей, решение которой может, в значительной мере, определить процесс развития машиностроения, энергетики, химической, добывающей и перерабатывающей промышленности в регионах Крайнего Севера и Арктики.

Заключение

Результаты фундаментальных и ориентированных исследований могут стать основой для разработки инновационных высокоэнергетических технологий, включающих в себя процессы формирования неразъемных соединений материалов, имеющих минимальные структурные изменения, существенно ухудшающие эксплуатационные показатели технических систем.

Разработки, выполненные в рамках развиваемого направления, могут стать универсальным ключом к эффективному решению фундаментальной задачи повышения живучести и эксплуатационной надежности технических систем ответственного назначения.

Дальнейшее проведение фундаментальных и ориентированных исследований в этом направлении представляет собой актуальную научно-техническую задачу, от решения которой всецело зависит дальнейшее развитие мирового промышленного производства.

*** Работа выполнена за счет средств
программы фундаментальных
исследований Российской Академии
наук 2012 - 2016 гг, а также проекта РНФ
№16-19-10010 , этап 2016 года**



Благодарю за внимание!