

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И АРКТИЧЕСКИХ ЛЬДОВ, ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНОЙ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ, МОДИФИЦИРОВАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗОН НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

¹Сараев Ю.Н., ^{1,4}Безбородов В.П., ¹Григорьева А.А., ¹Дмитриев А.И., ¹Лунев А.Г.,
¹Никонов А.Ю., ²Голиков Н.И., ²Сидоров М.М., ²Харбин Н.Н., ²Семенов С.В.,
³Горкунов Э.С., ³Гладковский С.В., ³Задворкин С.М., ³Путилова Е.А.,
³Двойников Д.А., ³Пшеницин Е.А.,
⁴Киселев А.С., ⁴Гордынец А.С., ⁴Солодский С.А., ^{1,4}Раев И.В.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН),
г. Томск,*

²*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск,*

³*Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург;*

⁴*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
litsin@ispms.tsc.ru*

Работа подготовлена по результатам одноименного проекта, выполненного в соответствии с Программой фундаментальных исследований Президиума РАН "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" на 2014 год.

Промышленное освоение Арктической и прибрежной зоны отдаленных районов Крайнего Севера требует коренного пересмотра вопросов обеспечения эксплуатационной надежности крупногабаритных металлоконструкций и техники специального назначения, используемой для защиты национальных интересов Российской Федерации в этом регионе [1]. Одним из направлений комплексных научных исследований Арктической зоны является надежность и живучесть технических систем ответственного назначения при их эксплуатации в условиях северных и арктических территорий. Это связано с тем, что в этих регионах сконцентрирована большая доля природных ресурсов, добыча которых будет способствовать развитию и укреплению экономического потенциала России. Вместе с тем, как уже хорошо показала практика, истощение работоспособности машин и механизмов на Севере имеет ускоренный характер. Экстремальные климатические условия значительно влияют на эксплуатацию техники и конструкций. В основном аварии конструкций сопровождаются их хрупким разрушением при отрицательных температурах эксплуатации. Так, например, по опыту эксплуатации техники на территории Якутии установлено, что поток отказов ряда деталей и узлов машин, большегрузных самосвалов, карьерных и шагающих экскаваторов и металлоконструкций увеличивается в 2-3 раза, по некоторым данным до 4..6 раз, что наносит экономике России большие убытки. В основном, это связано с накоплением технологических эксплуатационных повреждений и возникновением хрупких трещин. Помимо длительного воздействия низких температур, существуют другие факторы, усложняющие работу машин, механизмов и агрегатов в условиях северной зоны. В частности, работа горнодобывающего оборудования связана с ударным нагружением, осложняется вибрациями и дополнительными нагрузками из-за высокой абразивности, абразивности грунта из многолетнемерзлых пород, его налипания и намерзания на рабочие элементы.

Проблема повышения прочности и ремонта сварных конструкций для районов Сибири и Севера является сложной многофакторной задачей, обусловленной их эксплуатацией в сложных климатических условиях, в частности, очень низких температур, что требует разработки и использования хладостойких материалов, новых технологических процессов изготовления неразъемных соединений и после сварочной обработки. Важно обеспечивать комплекс требуемых физико-механических свойств и равнопрочность зон соединения, предотвращения образования в них холодных трещин, а также структур материалов, приводящих к снижению сопротивляемости соединений хрупкому и замедленному разрушению.

Арктическая зона, кроме отрицательных температур, характеризуется продолжительными сильными ветрами и высокой влажностью воздуха, несвойственными климату центральной, западной и южной Якутии. Как известно, для оценки влияния суровой погоды на технику используется критерий технической жесткости погоды, который зависит не только от температур воздуха, но и средней скорости ветра за три наиболее холодных месяца и относительной влажности воздуха наиболее холодного месяца. Эти факторы могут значительно влиять на работоспособность техники и конструкций. Таким образом, добыча полезных ископаемых в Арктике является в техническом плане сложной задачей, которая потребует детального изучения надежности и живучести технических систем ответственного назначения при их эксплуатации в условиях северных и арктических территорий.

Анализ причин отказов сооружений подтверждает, что зарождение трещин, приводящих к разрушению, преимущественно имеет место, в зонах сварных соединений. В магистральных нефте- и газопроводах более 50 % отказов приходится на кольцевые швы с образованием сквозной трещины-свища. Для вертикальных стальных резервуаров в более 80 % случаях аварий очагом разрушений является сварное соединение.

Причинами преждевременных отказов сварных соединений являются дефекты сварки, остаточные сварочные напряжения, низкая сопротивляемость зарождению и распространению трещин зоны термического влияния и металла шва [2]. Таким образом, проблема повышения работоспособности сварных соединений технических систем в условиях экстремальных низких температур, суточного и сезонного колебания температур, характерных для резко континентального климата, эксплуатация в сложных геологических условиях остается до сих пор актуальной.

Одной из важнейших задач создания надежных и долговечных машин и конструкций северного исполнения является разработка новых технологий сварки, которые являются основными методами изготовления металлоконструкций ответственного назначения. Как показывает практика, в процессе эксплуатации металлоконструкций (магистральных нефте- и газопроводов, резервуаров хранения нефтепродуктов и др.) требуется выполнять очень большой объем ремонтно-восстановительных работ с применением различных методов сварки [3,4]. Данное обстоятельство, в значительной мере, связано с изношенностью сооружений и конструкций, построенных, в основном еще в советское время. Проблема ремонта и повышения прочности сварных конструкций для районов Сибири и Севера является сложной многофакторной задачей, обусловленной их эксплуатацией в сложных климатических условиях, в частности, очень низких температур, что требует разработки и использования хладостойких материалов, новых технологических процессов изготовления неразъемных соединений и после сварочной обработки.

Одним из наиболее эффективных направлений повышения эксплуатационных показателей конструкций ответственного назначения является совершенствование

технологий сварки и наплавки за счет применения новых сварочных материалов, модифицированных мультифазными наноструктурными композициями, и методов адаптивной импульсно-дуговой сварки, которые обеспечивают возможность управления характером протекания микрометаллургических процессов за счет импульсного изменения энергетических параметров режима [5-8]. При этом, благодаря программируемому вводу тепла в зону сварного соединения, управлению процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, можно получить в зонах неразъемных соединений технических систем, дисперсную структуру. Это позволяет существенно уменьшить степень остаточных деформаций неразъемных соединений, изготавливаемых из различных марок сталей, а также повысить эксплуатационную надежность металлоконструкций и изделий, функционирующих в условиях низких климатических температур.

Вместе с тем, многие вопросы по выше обозначенной теме до сих пор являются мало изученными, что не позволяет в полной мере прогнозировать прочностные и эксплуатационные показатели металлоконструкций ответственного назначения при их работе в условиях низких климатических температур.

Цель работы: Развитие научных основ повышения эксплуатационных свойств металлоконструкций, используемых в условиях низких температур и арктических льдов, на основе исследований быстропротекающих процессов, плавления, переноса и кристаллизации металла шва из расплава на этапах формирования неразъемных соединений, получаемых методами адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки и модифицирования сварочной ванны композиционными порошками с субмикроструктурной структурой, определяющих их доминирующее влияние на характер структурообразования в зоне неразъемного соединения.

Материалы и методика исследования

В работе были исследованы образцы, вырезанные из различных зон сварных соединений (основной металл, материал околошовной зоны и материал шва) конструкционной легированной стали 09Г2С. Сварка осуществлялась электродами марки УОНИ 13/55 источником питания ФЕБ-315 «МАГМА» с пультом «Пульс» для реализации импульсно-дугового процесса сварки. Были подготовлены образцы, полученные по технологиям сварки на постоянном токе (СПТ) и сварки с модуляцией тока (СМТ) - метод адаптивной импульсно-дуговой сварки (Патент на изобретение РФ № 2410216).

Сварные соединения проб подвергались радиографическому контролю по методике ГОСТ 7512-82. Контроль производился рентгеновским аппаратом «Пион-2М», с применением радиографической пленки РТ-1.

Макроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа МБС-10 при увеличении $\times 12$, травление макрошлифа проводилось химическим способом в 3-% спиртовом растворе азотной кислоты, погружением шлифа до выявления границ сварного шва. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-21 при увеличении $\times 200$, травление микрошлифа проводилось химическим способом в 3 % спиртовом растворе азотной кислоты, погружением шлифа до выявления границ сварного шва. Измерение микротвердости сварных соединений всех исследованных образцов проводили в поперечном сечении на микротвердомере Leika с шагом 300 мкм при нагрузке 50 кгс.

Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной температуре на стандартных образцах типа 13 размером 5 x 10 x 55 мм с V-образным надрезом по ГОСТ 9454-78 с использованием инструментированного маятникового копра «Tinius Olsen IT 542M», обеспечивающего запись диаграмм ударного нагружения в

координатах «нагрузка-перемещение».

Механические испытания материалов на растяжение проводили на цилиндрических образцах с головками, изготовленных по ГОСТ 1497-84, при комнатной температуре на универсальной испытательной машине УММ-5 с максимальным усилием растяжения 50 кН и максимальным крутящим моментом 200 Нм.

Для исследований циклической долговечности стыковых сварных соединений стали были подготовлены сварные пробы по ГОСТ 5264-80, тип соединения С17. Предварительно на свариваемых пластинах размерами 130х260х6 мм нанесены фаски с углом скоса кромок 30° и притуплением 2 мм. Перед сваркой пластины во избежание послесварочных деформаций были собраны на специальном кондукторе с зазором 2,5 – 3,0 мм, при этом прихватки были расположены с торцов пластин. Односторонняя сварка листовых проб производилась в два слоя – корневой и облицовочный. При сварке корневого шва использовался электрод диаметром 3 мм, а для облицовочного - диаметром 4 мм.

При вырезке образцов для усталостных испытаний учитывались обнаруженные при радиографическом контроле дефектные участки шва так, чтобы дефекты не попадали в рабочее сечение. Каждый образец имел два боковых надреза глубиной (h) около 2 мм. Перед нанесением надрезов образцы подвергались химическому травлению с целью установления местоположения границ шва и зоны термического влияния (ЗТВ).

Циклические испытания проведены на оборудовании аккредитованной испытательной лаборатории Центра коллективного пользования «Станция низкотемпературных натурных испытаний» ИФТПС СО РАН (свидетельство об аккредитации № ИЛ/ЛПИ-002860).

Циклические испытания образцов при постоянно заданном уровне нагрузки проведены с помощью сервогидравлической машины Instron 8802. В процессе испытаний нагрузка прикладывается к испытываемому образцу последовательно с датчиком силы. Наибольшая предельная нагрузка 250 кН, пределы допускаемой относительной погрешности $\pm 0,5$ %. Циклическим испытаниям при комнатной температуре были подвергнуты образцы при частота нагружения - 5 кГц. Испытания проведены при малоцикловом растяжении до полного разрушения образцов, с отнулевой характеристикой цикла. Образцы испытывались при двух уровнях нагрузки примерно 330 МПа и 370 МПа, что составляет $0,8 \sigma_T$ и $0,9 \sigma_T$ соответственно. Циклические испытания при отрицательных температурах проведены сервогидравлической машиной Instron 8802 с использованием климатической камеры Instron-SFL, серии 3119. Охлаждение образцов в температурной камере производилось жидким азотом.

В процессе сварки регистрацию ее параметров осуществляли с помощью прибора AWR-224 МД и записывались в компьютер. Параметры используемых режимов сварки приведены в таблице 1.

Результаты эксперимента

Среднее значение погонной энергии корневого слоя дуговой сварки при СПТ составило -1964 кДж/м, а облицовочного - 2175 кДж/м. Среднее значение погонной энергии корневого слоя дуговой сварки по методу СМТ, составило -1349 кДж/м, а облицовочного - 1490 кДж/м. Таким образом, при СМТ погонная энергия обеих слоев меньше на 31 %, чем при сварке на постоянном токе, таблица 2.

Магнитные характеристики различных участков сварных соединений стали 09Г2С, полученных при различных режимах и параметрах сварки, определяли с использованием магнитно-измерительного комплекса Remagraph С-500. При

определении магнитных характеристик в процессе механических испытаний на одноосное растяжение по достижению определенной степени деформации процесс нагружения приостанавливали без разгрузки образца, и с помощью комплекса Remagraph С-500 регистрировали петли магнитного гистерезиса. Измерения магнитных характеристик материала из различных зон сварных соединений проводили в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеамметра. Магнитное поле напряженностью до 500 А/см прикладывали вдоль оси образца. Из петель магнитного гистерезиса определяли значения коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r и намагниченности в максимальном приложенном поле $M_{\text{макс}}$ (примерно равной намагниченности насыщения). Погрешность измерения поля и индукции не превышала 3 %. Из основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ (Таблица 3).

Основной металл - сталь 09Г2С имеет твердость $\sim 250 \text{ HV}_{0.05}$, материала шва $\sim 270 - 300 \text{ HV}_{0.05}$, \sim околошовной зоны (ОШЗ) - $210 - 230 \text{ HV}_{0.05}$. Согласно общепринятым представлениям разброс значение твердости в сварных швах не должен превышать 20 %. Распределение микротвердости для исследованных образцов попадает в двадцати процентный критерий. На исследованных образцах отсутствуют макродефекты, рис. 1 и 2.

Микроструктура исследованных материалов в исходном состоянии представляет собой феррито-перлитную смесь со строчечностью перлитных колоний, рис. 3. Размер зерна составляет в среднем $\sim 10 \text{ мкм}$, что соответствует 10 баллу зерна. Размер зерна ОШЗ превышает размер исходного зерна, что связано с перегревом металла в процессе сварки. При сварке на постоянном токе зона с укрупненным размером зерна шире, чем при сварке с модуляцией тока, что позволяет говорить о больших тепловложениях в процессе СПТ и о длительном термическом воздействии горячей дуги [7,8], рис.4. Металлографические исследования сварных соединений выявили измельчение \sim в 1,5 раза структурных составляющих материала ОШЗ после СМТ. Это объясняется особенностями импульсного режима сварки, при котором происходит многократное перемешивание расплава и образование множества новых центров кристаллизации. При использовании режимов СМТ ширина околошовной зоны меньше и в ней не отмечается роста зерна. Это положительно влияет на качества сварного соединения в целом. Феррито-карбидная структура шва напоминает видмандштеттову структуру, рис. 5. Однако при этом снижения прочностных характеристик, характерного для сталей с видмандштеттовой структурой, не наблюдается. Структуре центра шва характерны крупные бейнитные зерна с зернами феррита по границам. Размер зерен образцов после СПТ больше, чем образцов после СМТ \sim в 1,5 раза. Это объясняется тем, что металл корневого и заполняющего слоев шва после кристаллизации подвергается повторному нагреву при наложении последующих слоев. В результате повторного нагрева протекает перекристаллизация (нормализация). При стационарном режиме сварки температура нагрева корневого заполняющего слоев шва выше температуры фазовой перекристаллизации, и, как следствие, происходит рост зерна. При сварке модулированным током вторичный нагрев происходит при температуре, близкой к температуре полиморфного превращения, что способствует измельчению структуры. Повышение твердости в зоне шва коррелирует с результатами механических испытаний на одноосное растяжение.

Важно отметить, что показатель $\sigma_{0.2}/\sigma_B$, рост которого характеризует снижение запаса пластичности металла, для материала шва несколько меньше, чем для основного металла и ОШЗ, см. таблица 3. Наибольшие значения $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ имеет материал ОШЗ что свидетельствует о повышенной вероятности протекания хрупкого разрушения именно в этой зоне. Наиболее равнопрочным сварным соединением

является сварное соединение, полученное по технологии СМТ: изменение соотношения прочностных характеристик от зоны к зоне не превышает 2,5 %. Образцы сварных соединений после испытаний при комнатной температуре имеют вязкий излом в зоне долома, а при отрицательной температуре хрупкий, рис.6, 7, 8 и 9. Установленный эффект подтверждается, в том числе и ранее проведенными исследованиями [11-13].

Разделение общей работы разрушения при ударных испытаниях на составляющие ударной вязкости (работу зарождения и распространения трещины) проводили на основе анализа экспериментальных диаграмм ударного нагружения, рис. 10 и 11. Значения параметра динамической трещиностойкости (J_{1d}) рассчитывались по формуле: $J_{1d} = 2 A_3/B(W-a)$, где A_3 – работа зарождения трещины; B – ширина образца; W – высота образца; a – длина концентратора напряжений (надреза или усталостной трещины).

Испытания показали, что при комнатной температуре ударная вязкость металла ОШЗ для всех образцов выше, чем у основного металла. Максимальная ударная вязкость ($KCV = 1,05 \text{ МДж/м}^2$) достигается на образцах, вырезанных из ОШЗ, и, сваренных по технологии СМТ. Наиболее низкие значения $KCV = 0,86 \text{ МДж/м}^2$ соответствуют металлу ОШЗ образцов, сваренных по технологии СПТ. При этом изломы всех испытанных образцов имеют вязкое (волокнистое) строение. Значения параметра динамической трещиностойкости J_{1d} , хорошо коррелируют с величиной ударной вязкости. Они позволяют наиболее ярко выявить преимущества ОШЗ в образцах, сваренных в режиме с модуляцией тока, в сопротивлении хрупкому разрушению металла по сравнению с режимом сварки на постоянном токе. Значения работы распространения трещины (A_p), полученные по результатам обработки диаграмм удара, в 2-5 раз выше значений работы зарождения трещины (A_3) для всех испытанных образцов. Это свидетельствует о значительном запасе конструкционной прочности металла различных участков сварного соединения.

С понижением температуры испытаний до -60°C ударные характеристики основного металла меняются незначительно, а на ряде образцов металла ОШЗ происходит существенное снижение сопротивления хрупкому разрушению и появление «хрупких скачков» на диаграммах ударного нагружения. Снижение значений работы зарождения трещины (A_3) и характеристик динамической трещиностойкости (J_{1d}) с понижением температуры испытаний происходит в значительно меньшей степени. Однако за счет снижения значений работы распространения трещины (A_p), характеризующей запас конструкционной прочности, соотношение A_p/A_3 с понижением температуры испытаний от комнатной до -60°C также существенно уменьшается. Для металла ОШЗ наиболее высокий уровень характеристик ударной вязкости при -60°C сохраняется на образцах, полученных методом СМТ. После испытаний образцов при комнатной температуре излом вязкий, размер ямок 10 - 40 мкм. Такая картина наблюдается в основном металле, так и в околошовной зоне, рис. 12, 13, 14 и 15.

Механизм разрушения образцов после испытания при температуре -60°C для основного металла: вязкий, ямочный, а для околошовной зоны – квазискол. Однако для образцов после СМТ механизм разрушения смешанный - присутствуют участки с вязким ямочным изломом. Это свидетельствует о том, что данные режимы сварки обеспечивают снижение риска появления трещин в околошовной зоне.

При низких значениях размаха коэффициента интенсивности напряжений наклон Перисовского участка для образцов, вырезанных из основного металла и околошовной зоны со сварным швом, выполненным сваркой с модуляцией тока, идентичен. Для образцов, изготовленных из околошовной зоны сварного соединения,

полученного на постоянном токе, наклон центрального участка кривой более пологий, что говорит о повышенной способности материала сопротивляться росту усталостной трещины при низких значениях коэффициента интенсивности напряжений. Однако, при значении размаха коэффициента интенсивности напряжений $\sim 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ имеет место резкое ускорение скорости роста усталостной трещины, свидетельствующее о возможном достижении материалом критического коэффициента интенсивности напряжений, рис. 16 и 17. Характерный перелом линейного участка для основного металла достигается при размахе коэффициента интенсивности напряжений порядка $20,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Особенностью состояния материала околошовной зоны в образцах, изготовленных по технологии СМТ, является отсутствие перегибов даже при достижении размаха коэффициента интенсивности напряжений $24 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и отсутствие тенденции к ускорению роста усталостной трещины. Проведенные сравнительные испытания выявили преимущества в циклической трещиностойкости в области коэффициента интенсивности напряжений свыше $20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ металла ОШЗ сварного соединения, полученного СМТ.

Магнитные свойства основного металла и материалов ОШЗ и шва: в исходном состоянии коэрцитивная сила основного металла меньше, чем металлов ОШЗ и шва. Увеличенная магнитная жесткость металла ОШЗ и шва обусловлена большим содержанием легирующих элементов в материале электрода, а также наличием в их структуре дисперсного бейнита и повышенным уровнем внутренних напряжений в металлах шва и ОШЗ. Формируется магнитная текстура напряжений (наведенной магнитной анизотропии) [12-15]. Если магнитострикция материала и внешние напряжения одного знака, то наблюдается преимущественная ориентация магнитных моментов доменов по направлению приложения нагрузки, и поэтому при намагничивании вдоль оси растяжения наблюдается снижение значений коэрцитивной силы и рост максимальной магнитной проницаемости и остаточной индукции. При дальнейшем нагружении магнитострикция железа и сплавов на его основе может менять знак, за счет чего меняется тип магнитной текстуры, и коэрцитивная сила возрастает, а B_r и $\mu_{\text{макс}}$ уменьшаются. Действие напряжений, достигающих и превышающих предел текучести, приводит к тому, что основным фактором, влияющим на коэрцитивную силу в области пластической деформации, является увеличение плотности дислокаций и дислокационных скоплений ($H_c \sim N^{1/2}$, где N – плотность дислокаций). Остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость при этом уменьшаются.

При выполнении исследований по влиянию различных возмущений на стабильность технологического процесса сварки, были получены оригинальные результаты по исключению доминирующего влияния одного из самых распространенных эффектов, делающих невозможным получение неразъемного соединения – эффект магнитного дутья, рис. 18.

С целью исключения магнитного дутья было предложено инновационное решение проблемы дуговой сварки, например, намагниченных труб посредством использования переменного прямоугольного тока, рис. 19 и 20. В предлагаемом технологическом решении, смена полярности осуществляется в момент критического отклонения дуги от оси электрода (Патент РФ № 2245231), рис. 20. Такой алгоритм коммутации тока в сварочной цепи позволяет исключить обрывы дуги, стабилизировать её пространственное положение и получать сварные соединения при величине индукции магнитного поля в зоне сварки до 0,1 Тл. Для его реализации разработан полупроводниковый инвертор тока, который предназначен для включения в сварочную цепь выпрямителя или генератора с падающей внешней вольтамперной характеристикой [18, 19].

При наличии магнитного поля (100 мТл) в зазоре процесс дуговой сварки постоянным током обратной полярности характеризуются особенностями:

- 1) по мере приближения к зазору (5...7 мм) траектория валика наплавляемого металла изменяет направление, смещение которого на кромке зазора достигает 3...5 мм;
- 2) с момента начала пересечения зазора происходит одностороннее отклонение столба дуги и вытеснение из-под козырька покрытия расплавленного электродного металла, что исключает возможность коротких замыканий и приводит к погасанию дуги в момент отрыва капли.

При этом межэлектродное расстояние после гашения дуги не превышает 3 мм. Возмущающее действие магнитного поля в непосредственной близости от зазора проявляется в существенном отклонении от начальной оси столба тока. При этом наблюдается повышенное разбрызгивание электродного металла, что обусловлено большой длительностью полупериодов тока, за время которых магнитное поле успевает вытеснить расплавленный металл из-под козырька покрытия электрода. Такой характер переноса металла препятствует сплавлению кромок пластин секционированного изделия. О незначительном повышении стабильности горения дуги в этом случае свидетельствует величина межэлектродного расстояния после её гашения (3,7...7,5 мм). Увеличение частоты переменного прямоугольного тока до 500 Гц позволяет получать сплавление кромок пластин. В этом случае положение столба дуги нормализуется, а объем расплавленного металла на торце электрода в силу инерции практически не подвержен отклонению от его оси в период горения дуги и последующих коротких замыканий межэлектродного промежутка. Все это свидетельствует о стабильности процесса сварки и подтверждается высоким значением межэлектродного расстояния после гашения дуги (20,5...24,3 мм).

Таким образом, выполненные исследования, а также их результаты, позволили получить новые знания о кинетике разрушения материалов, имеющих зоны структурной неоднородности, особенно при низких температурах испытаний образцов (вплоть до -60°C), установить взаимосвязь структуры и механических характеристик отдельных зон неразъемного соединения, обосновать принципиальную возможность обеспечения стабильного горения дуги при возмущающем действии внешнего магнитного поля.

Выводы

1. Разработаны методики проведения исследований влияния остаточной намагниченности свариваемых деталей из низколегированных марганцовистых сталей на процесс формирования неразъемного соединения; расчета остаточного ресурса сварных соединений при статической и малоцикловой нагрузках, позволяющие сделать заключение о возможности дальнейшей эксплуатации этих соединений в условиях низких климатических температур, исследования остаточных напряжений в сварном соединении сталей при низких температурах.

2. Исследования микроструктуры отдельных зон сварных соединений конструкционной стали 09Г2С, полученных по различным технологическим режимам сварки, показали, что для материала шва и ОШЗ при адаптивном импульсно-дуговом режиме наблюдается эффект измельчения микроструктуры.

3. Исследовано влияние импульсно-дуговой сварки на структуру и механические характеристики сварного соединения низкоуглеродистых сталей типа 09Г2С: составляющие ударной вязкости, динамическую и циклическую трещиностойкость различных участков соединений.

4. Установлено, что применение метода импульсно-дуговой сварки позволяет получать сварные соединения низкоуглеродистых сталей типа 09Г2С, обладающие мелкозернистой структурой в металле шва и ЗТВ. Происходит

перемешивание расплава с образованием новых центров кристаллизации и измельчение структурных составляющих $>1,5$ раза.

5. В результате импульсно-дуговой сварки вторичный нагрев происходит в непосредственной близости к температуре полиморфного превращения, что оказывает заметное влияние на механические характеристики сварных соединений.

6. Применение метода СМТ обеспечивает более равномерное распределение микротвердости по сечению сварного шва по сравнению с результатами, полученными на образцах, сваренных на постоянном токе.

8. Ударная вязкость основного металла несколько ниже соответствующих показателей металла ОШЗ. При общем незначительном различии в ударных характеристиках металла ОШЗ для всех изученных технологических режимов сварки наибольшее значение $KCV=1,05$ МДж/м² достигается на образцах после СМТ, а максимальные значения показателя динамической трещиностойкости $J_{id} = 0,44-0,46$ МДж/м² получены на образцах металла ОШЗ после СМТ.

9. С понижением температуры испытаний до -60°C характеристики ударной вязкости основного металла меняются незначительно. Для металла ОШЗ наиболее высокие значения характеристик ударной вязкости при -60°C сохраняются только на образцах после СМТ.

10. Наиболее равнопрочным сварным соединением является сварное соединение, полученное по технологии СМТ с $I_{д\text{ ср}}=70$ А, для которого изменение соотношения прочностных характеристик отдельных зон сварного соединения не превышает 2,5 %;

11. Значения параметра динамической трещиностойкости хорошо коррелируют с величиной ударной вязкости, что позволяет более четко выявить преимущества в сопротивлении хрупкому разрушению металла ОШЗ после СМТ.

12. Наибольшие значения показателя $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ металла ОШЗ образцов, полученных по технологии СМТ ($I_{д\text{ ср}}=70$ А) и СПТ ($I_{д}=76$ А) по сравнению с другими исследованными материалами указывают на его пониженную способность к пластической деформации и более высокую вероятность протекания хрупкого разрушения сварных соединений, изготовленных именно по этим технологическим режимам;

13. Установлено, что в диапазоне напряжений одноосного растяжения от 0 до $\sigma = 0,4\sigma_{0,2}$ для всех исследованных материалов коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость изменяются монотонно. Это позволяет использовать эти характеристики для оценки степени деформации одноосным растяжением на стадии упругих напряжений в изделиях из исследованных материалов в процессе эксплуатации.

14. Выявлен механизм роста трещин в зонах шва, термического влияния и основного металла. Определены оптимальные значения энергетических параметров режима, которые обеспечивают наиболее равнопрочные свойства всех зон сварных соединений. При этом изменения соотношений прочностных характеристик отдельных зон сварного соединения не превышают 2,5 %. Достигаются наибольшие значения ударной вязкости и показателя динамической трещиностойкости.

15. Проведенные сравнительные циклические испытания выявили преимущества в циклической трещиностойкости в области КИН свыше $20\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ металла ОШЗ сварного соединения пластин из стали 09Г2С, полученного СМТ по сравнению с основным металлом.

16. Установлено, что при комнатной температуре в малоцикловой области долговечность металла шва сварных соединений стали 09Г2С, полученных сваркой модулированным током, на 6 %, а при температуре испытания -40°C уже на 13-30 %

выше, чем полученного СПТ.

17. На уровне нагрузки $0,9 \sigma_T$ циклическая долговечность образцов, полученных СМТ, при комнатной температуре на 22 %, а при отрицательной (-40°C) на 48 % выше, чем образцов, сваренных СПТ.

18. Результаты механических испытаний на одноосное растяжение коррелируют с повышением твердости в зоне шва. Наибольшие значения соотношения пределов текучести и прочности имеет материал ОШЗ, что свидетельствует о повышенной вероятности протекания хрупкого разрушения именно в этих зонах. Изломы образцов имеют вязкое (волокнистое) строение. Поры и несплошности отсутствуют.

19. Изучено влияние напряженного состояния на магнитные характеристики конструкционных сталей, эксплуатируемых при низких климатических температурах. Получены зависимости магнитных характеристик от приложенных напряжений, моделирующих реальные условия работы трубопроводов, и установлены характеристики, которые могут служить информативными параметрами методики неразрушающей диагностики текущего состояния материала разных зон сварных конструкций.

20. Исследовано влияние упругопластического деформирования на магнитные характеристики металла из различных зон сваренных темплетов. Обнаружено, что анализ полевых зависимостей дифференциальной магнитной проницаемости позволяет получать информацию о состоянии отдельных компонентов сварного соединения, в отличие от других магнитных неразрушающих методов, дающих интегральную характеристику всего намагничиваемого объема материала.

21. Установлено, что в диапазоне напряжений одноосного растяжения от нуля до 40 % от предела текучести для всех исследованных материалов коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость изменяются монотонно. Полученные характеристики можно применять для оценки степени деформации на стадии упругих напряжений в изделиях в процессе эксплуатации.

Заключение

Предложен новый комплексный подход для решения проблемы повышения эксплуатационной надежности и живучести технических систем ответственного назначения, предназначенных для работы в условиях низких климатических температур, в частности повышения усталостной и механической прочности сварных соединений, изготавливаемых из современных марок легированных сталей, методами модифицирования присадочных материалов, используемых при адаптивных импульсных технологиях сварки, ультрадисперсными и нано-размерными частицами химических соединений. Использование в шихте расходных материалов - в электродах и проволоках, компонентов, содержащих микро-легирующие добавки, позволяет активно влиять на структуру и свойства формируемого металла. При модифицировании измельчается структура металла шва, и, как следствие, повышаются физико-механические и эксплуатационные свойства.

Новизна развиваемого подхода, заключается также в обеспечении непрерывного контроля над металлургическими процессами на этапе формирования неразъемных соединений, путем комплексного применения новых присадочных материалов, модифицированных мультифазными наноструктурными композициями, использования оборудования и технологий адаптивной импульсно-дуговой сварки и наплавки, которые позволяют через программируемый ввод тепла в зону сварного соединения управлять процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла и, как следствие, обеспечивать формирование дисперсных структур в зонах сварных соединений технических систем, что приводит к повышению сопротивляемости этих соединений замедленному и хрупкому разрушению. Это

позволяет существенно уменьшить степень остаточных деформаций в зонах структурной неоднородности, и, как следствие, повысить эксплуатационную надежность металлоконструкций и изделий, функционирующих в условиях низких климатических температур путем предотвращения образования в них холодных трещин. Развиваемый в рамках предлагаемого проекта подход, позволит решить фундаментальную проблему повышения прочностных и эксплуатационных свойств машин, механизмов и транспортных средств, предназначенных для работы в условиях низких температур и арктических льдов», подвергающихся интенсивному износу.

Показано, что использование импульсного режима сварки обеспечивает за счет регулируемого ввода тепла в изделие значительное измельчение структуры металла шва и наиболее подверженной структурным изменениям ЗТВ, в результате чего предотвращается резкое падение микротвердости и прочности в этой зоне, и, тем самым, снижается степень разупрочнения зоны сплавления сварного шва. В совокупности, указанные изменения способствуют снижению послесварочных деформаций и увеличению ударной вязкости сварных соединений. Так, например, ударная вязкость сварных соединений, сформированных с использованием электродов марок МТГ и Kessel, повысилась на 8-27% при испытаниях при температуре +20°C и на 15-24 % при -60°C. При этом величина предела прочности (σ_B) сварных соединений, полученных этими электродами, почти не изменились по сравнению с характерными для стационарного режима и составили ≈ 560 МПа. Указанные значения ударной вязкости получены на сварных соединениях, которые не были подвергнуты термической обработке (нормализации или улучшению), обычно проводимой для образцов и изделий из данного класса низколегированных сталей. По уровню прочности сварные соединения исследованных сталей после импульсного режима сварки соответствуют требованиям, предъявляемым к сварным соединениям, что позволяет исключить послесварочную термическую обработку. Усталостная прочность образцов сварных соединений после стационарного режима сварки составила $\sim 2,06 \times 10^5$ циклов. После импульсного режима усталостная прочность повысилась до $2,53 \times 10^5$ циклов. Зарождение и распространение усталостных трещин, приводящих к разрушению образцов, в обоих случаях происходило в области ребра или боковой поверхности образца на расстоянии 8-10 мм от сварного шва.

Установлено, что одним из наиболее эффективных направлений управления характером протекания микрометаллургических процессов, является применение новых присадочных материалов, модифицированных мультифазными наноструктурными композициями, обеспечивающими повышение ресурса металлоконструкций и изделий, функционирующих в условиях низких климатических температура, а также использование оборудования и технологий адаптивной импульсно-дуговой сварки и наплавки, которые позволяют через программируемый ввод тепла в зону сварного соединения, управление процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, создание в зонах сварных соединений технических систем мелкодисперсной структуры в металле шва и зоне термического влияния, существенно уменьшить степень остаточных деформаций сварных соединений, изготавливаемых из различных марок сталей, а также повысить их эксплуатационную надежность.

Определены принципы модифицирования металлов сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) с целью формирования в них дисперсных наноразмерных структур для повышения физико-механических и эксплуатационных свойств неразъемных соединений низколегированных марганцовистых сталей.

На основе комплексных исследований свариваемости и технологической прочности сварных соединений из низколегированных сталей при сварке в условиях

низких температур обоснованы требования к структуре и свойствам зон сварного соединения, а также к выбору хладостойких сталей.

Разработаны технологические рекомендации по сварке корневых и заполняющих слоев неразъемных соединений, в том числе имеющих остаточное намагничивание. Модернизирован исследовательский комплекс по регистрации быстропротекающих процессов характеристик тепло- и массопереноса.

Проведение работ в указанном направлении исследований имеет большое научное и практическое значение, поскольку позволит расширить представление о направлениях повышения эксплуатационных свойств неразъемных соединений металлоконструкций ответственного назначения, получаемых с использованием современных технологий сварки и наплавки, и сформировать технологические рекомендации по практической реализации полученных результатов в сфере промышленного производства.

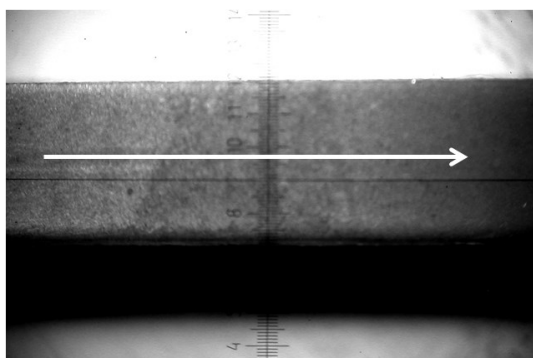
Список литературы

1. Псахье С. Г., Сараев Ю.Н., Лебедев М.П., Слепцов О.И., Голиков Н.И., Капитонова Т.А. Ж. Сварочное производство, 2013, 11, 50-52.
2. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Григорьева А. А., Голиков Н. И., Дмитриев В. В., Санников И. И. Ж. Сварочное производство, 2014, № 2, 3 – 7.
3. Сараев Ю.Н., Макарова Л.И., Кирилова Н.В. и др. Ж. Сварочное производство, 2001, 5, 31-37.
4. Сараев Ю.Н. Сб. Материалов международной научно-практической конференции «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». 11-12 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург, 236 с., 188-198. (Принята к печати в спецвыпуске журнала «Вопросы материаловедения № 1, 2015 г.).
5. Сараев Ю. Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. Новосибирск: Наука, 1994, 108.
6. Сараев Ю.Н. Ж. Сварочное производство, 2002, 1, 4-11.
7. Сараев Ю.Н., Слепцов О.И., Безбородов В.П. и др. Ж. Физическая механика, 2005, 8, 137-140.
8. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Кирилова Н.В., Никонова И.В. Ж. Сварочное производство, 2002, 8, 3-8.
9. Горкунов Э.С., Сараев Ю.Н., Задворкин С.М., Путилова Е.А. Сб. Материалов международной научно-практической конференции «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». 11-12 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург, 236 с., 188-198. (Принята к печати в спецвыпуске журнала «Вопросы материаловедения № 1, 2015 г.).
10. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Григорьева А.А., Лебедев В.А., Максимов С.Ю., Голиков Н.И. Сб. Материалов международной научно-практической конференции «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». 11-12 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург, 236 с., 199-205 (Принята к печати в спецвыпуске журнала «Вопросы материаловедения № 1, 2015 г.).
11. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989, 230 с.
12. Дмитриев А.И., Сараев Ю.Н., Никонов А.Ю., Григорьева А.А. Сб. Материалов международной научно-практической конференции «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». 11-12 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург, 236 с., 43-50. (Принята к печати в спецвыпуске журнала «Вопросы материаловедения № 1, 2015 г.).
13. Вонсовский С.В. Ферромагнетизм / Вонсовский С.В., Шур Я.С.. – Л.: ОГИЗ, 1948. – 816 с.

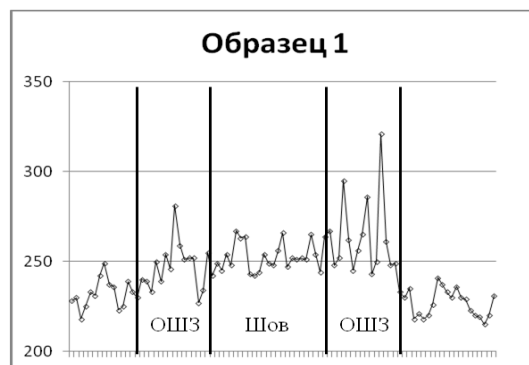
14. Гладковский С.В., Сараев Ю.Н., Двойников В.Е., Веселова, Е.А. Пшеницин. Сб. Материалов IV интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии», ИММт, УрФУ, 15-18 декабря 2014 г., Россия, Екатеринбург (доклад направлен в Оргкомитет и принят к публикации в Материалах конференции).
14. Дунаев Ф.Н. Ж. Изв. Вузов, сер. Физика, 1962, 1, 151-153.
15. Зайкова В.А., Шур Я.С. Ж. ФММ, 1966, Т. 51, 5, 664-673.
16. Kersten M. Die Bedeutung der Koerzitivkraft. Probleme der Technischen Magnetisierungskurve / Kersten M. – Hrsg. R. Becker. B.: Springer, 1938. – S. 42-72.
17. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А. Ж. Контроль и диагностика (принята к печати в 2015 году).
18. Киселев А.С., Гордынец А.С., Дедюх Р.И., Сараев Ю.Н., Голиков Н.И. Сб. Материалов международной научно-практической конференции «Сварка и родственные технологии в экстремальных и особых условиях». 11-12 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург, 236 с., 88-95, (Принята к печати в спецвыпуске журнала «Вопросы материаловедения № 1, 2015 г.).
19. Киселев А.С., Гордынец А.С., Сараев Ю.Н., Голиков Н.И. Сб. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром»: тезисы докладов VII отраслевого совещания 10-14 ноября 2014 г. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014, – 70 с, 36.

Таблица 1
Режимы сварки пластин

Номер образца	Режим сварки	Параметры тока и напряжения	Ток имп., А. Длит. имп., сек.	Ток паузы, А. Длит. паузы, сек	Операция подварки корня шва
1	Сварка на постоянном токе (СПТ)	Корень: ф 3 мм, УОНИ 13/55. $I_d = 70 \text{ A}$; $U_d = 20,5 \text{ В}$. Заполнение: (УОНИ 13/55) Ф 3 мм. $I_d = 105 \text{ A}$; $U_d = 21,5 \text{ В}$.	-	-	Не требовалась
4	Сварка с модуляцией тока (СМТ)	Корень: ф 3 мм, УОНИ 13/55. $I_{д\text{ ср}} = 70 \text{ A}$; $U_{д\text{ ср}} = 19,5 \text{ В}$. Заполнение: (УОНИ 13/55) Ф 3 мм. $I_{д\text{ ср}} = 88 \text{ A}$; $U_{д\text{ ср}} = 21,0 \text{ В}$.	$I_{и} = 100 \text{ A}$; $t_{и} = 0,2$. $I_{и} = 140 \text{ A}$; $t_{и} = 0,2$.	$I_{п} = 30 \text{ A}$; $t_{п} = 0,4$. $I_{п} = 30 \text{ A}$; $t_{п} = 0,4$.	Частичная подварка
17	Сварка на постоянном токе (СПТ)	Корень: ф 3 мм, УОНИ 13/55. $I_d = 76 \text{ A}$; $U_d = 20,5 \text{ В}$. Заполнение: (УОНИ 13/55) Ф 3 мм. $I_d = 76 \text{ A}$; $U_d = 20,5 \text{ В}$.			
18	Сварка с модуляцией тока (СМТ)	Корень: ф 3 мм, УОНИ 13/55. $I_d = 66 \text{ A}$; $U_d = 20 \text{ В}$. Заполнение: ф 3 мм, УОНИ 13/55. $I_{д\text{ ср}} = 76 \text{ A}$; $U_{д\text{ ср}} = 21,6 \text{ В}$.	$I_{и} = 80 \text{ A}$; $t_{и} = 0,3$. $I_{и} = 100 \text{ A}$; $t_{и} = 0,3$.	$I_{п} = 30 \text{ A}$; $t_{п} = 0,3$. $I_{п} = 30 \text{ A}$; $t_{п} = 0,3$.	

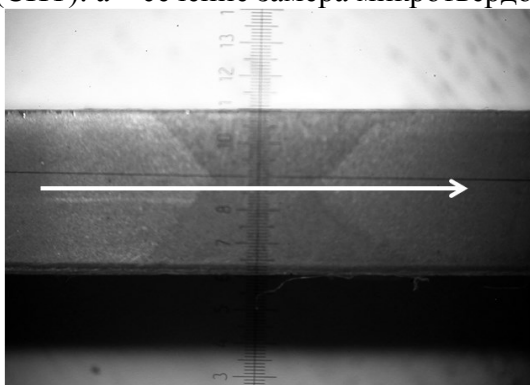


а

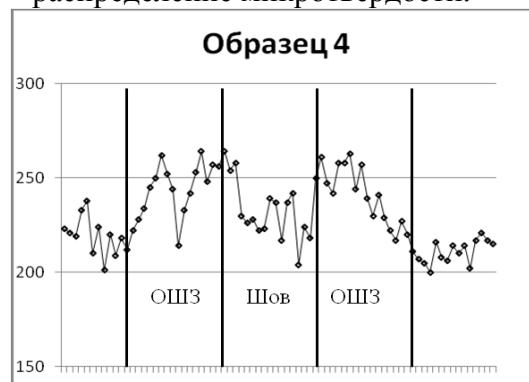


б

Рис. 1. Общий вид зоны сварного шва и распределение микротвёрдости в образце (СПТ): а – сечение замера микротвёрдости, б – распределение микротвёрдости.



а



б

Рис. 2. Общий вид зоны сварного шва и распределение микротвёрдости в образце 4 (СМТ): а – сечение замера микротвёрдости, б – распределение микротвёрдости

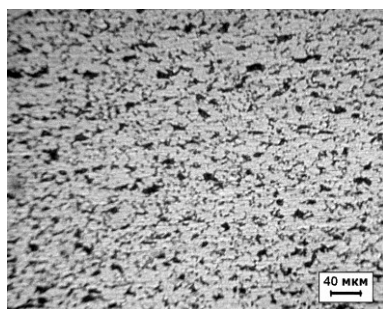
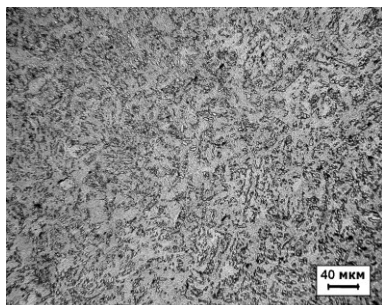
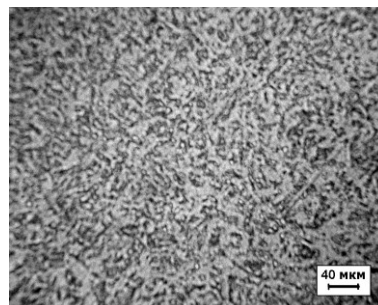


Рис. 3. Микроструктура основного металла сварного соединения стали 09Г2С.



а



б

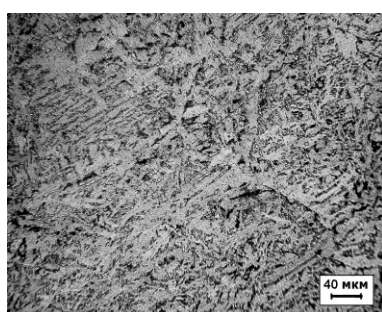
Рис. 4. Микроструктура ОШЗ сварного соединения при различных режимах сварки: а) СПТ; б) СМТ.

Таблица 2

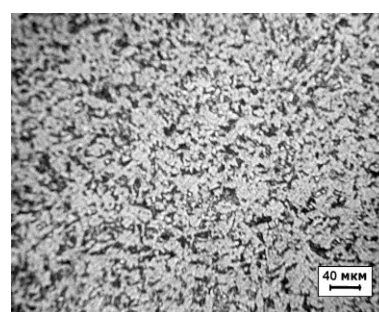
Характеристики ударной вязкости и динамической трещиностойкости различных участков сварного соединения стали 09Г2С при комнатной температуре

Материал (№ образца)	$T_{исп.}, ^\circ C$	KCV, МДж/м ²	A_z , Дж	A_p , Дж	A_p / A_z	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 /№1	20	0,86	7,60	26,57	3,50	0,38
	-60	0,61	7,52	16,35	2,17	0,39
ОШЗ /№ 4	20	1,05	8,49	32,19	3,79	0,44
	-60	0,49	9,44	9,69	1,03	0,49
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	22,79	2,22	0,51

где A - полная работа разрушения образца; A_z - работа на зарождение трещины; A_p - работа на распространение трещины; KCV - ударная вязкость; J_{id} - динамическая трещиностойкость (вязкость разрушения).



а



б

Рис. 5. Микроструктура металла шва после сварки: а) СПТ; б) СМТ.

Таблица 3

Механические и магнитные свойства исследованных материалов

Материал/ №образца	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	$\sigma_{0.2}/\sigma_B$	H_c , А/см	B_r , Тл	μ_{max}	M_{max} , Тл
Основной металл	375	480	21	38	0,78	4,12	1,23	1342	2,23
ОШЗ /№1	340	450	15	44	0,76	4,37	1,28	1430	2,13
ОШЗ /№4	370	465	17	39	0,80	5,61	1,16	1039	2,22
ОШЗ /№17	375	460	17	43	0,81	4,51	1,27	1328	2,08
ОШЗ /№18	370	470	16	42	0,79	4,70	1,20	1346	2,16
Шов/№1	375	480	11	51	0,78	5,95	1,00	824	2,23
Шов/№4	370	495	10	50	0,74	6,00	1,03	834	2,20
Шов/№17	345	495	15	42	0,70	5,22	0,882	883	2,12
Шов/№18	345	510	18	50	0,67	5,57	0,962	861	2,13

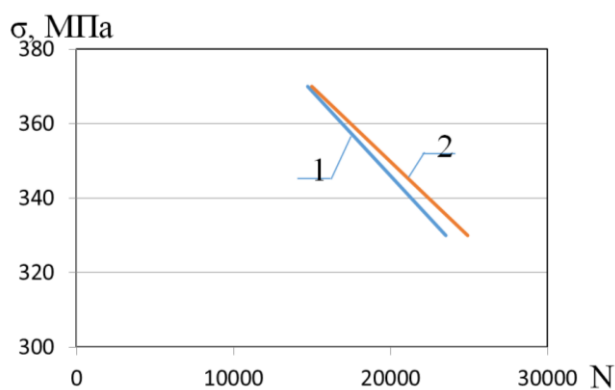


Рис. 6. Усталостные линии металла шва сварных соединений из стали 09Г2С после испытаний при комнатной температуре: 1 – СПТ; 2 – СМТ.

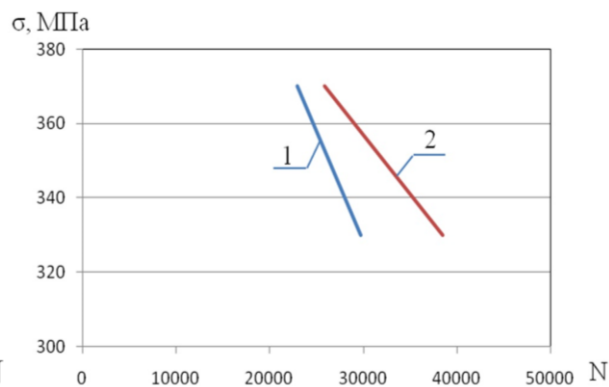


Рис. 7. Усталостные линии металла шва сварных соединений после испытаний при комнатной температуре -40 °C: 1 – СПТ; 2 – СМТ



Рис. 8. Усталостная трещина в сварном соединении, образовавшаяся при испытаниях при температуре испытаний -40°С.

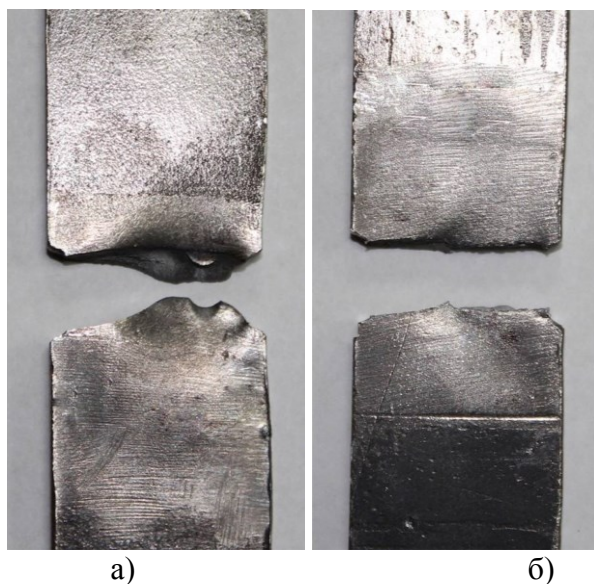


Рис. 9. Фотографии мест изломов образцов сварных соединений после циклических испытаний при комнатной температуре (а) и отрицательной температуре -40 °C (б).

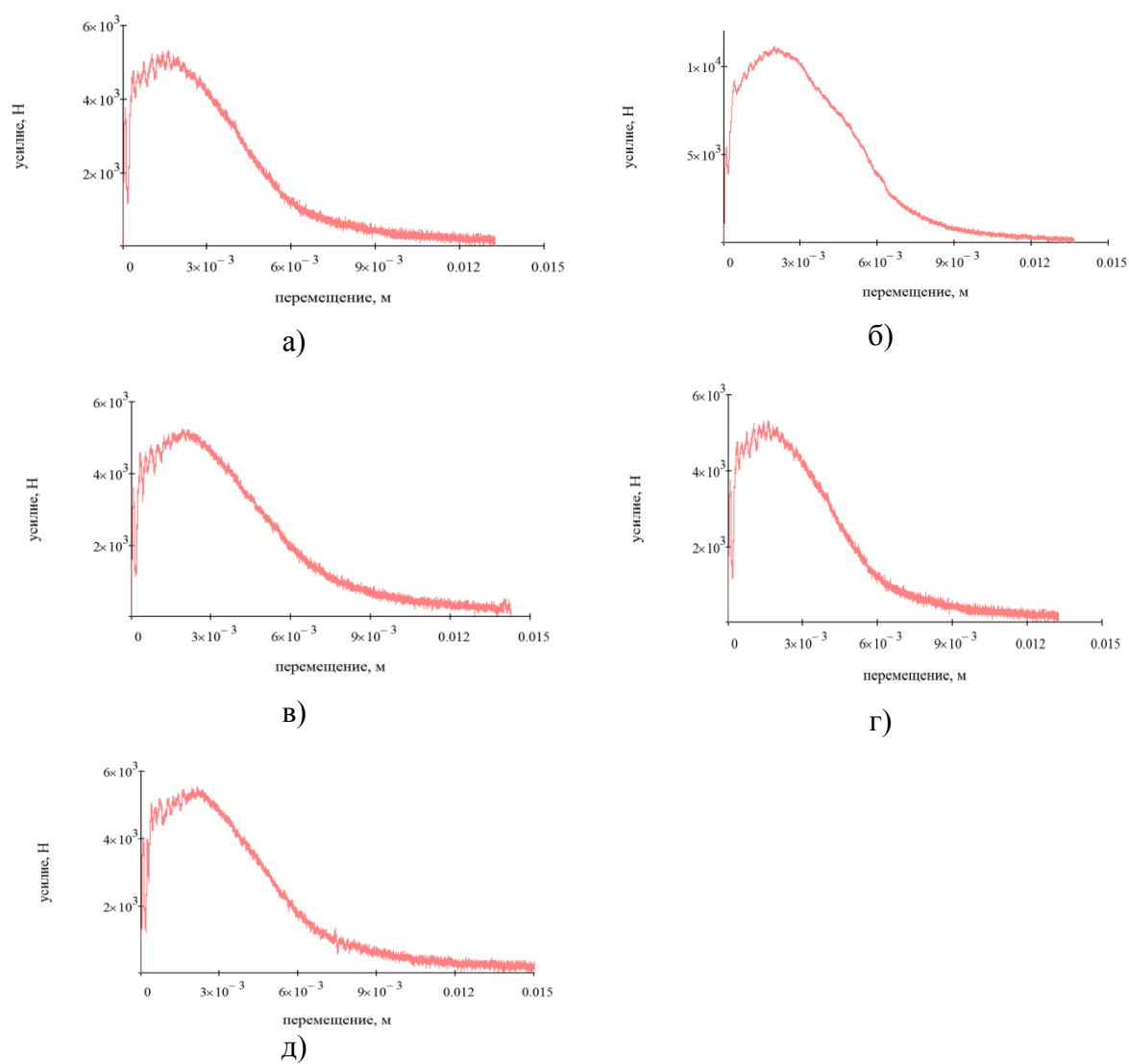


Рис. 10. Диаграммы ударного нагружения образцов из основного металла (ОМ) и околошовной зоны (ОШЗ) при комнатной температуре: а – основной металл (ОМ); б – ОШЗ /№1; в – ОШЗ /№ 4; г – ОШЗ /№ 17; д – ОШЗ /№ 18.

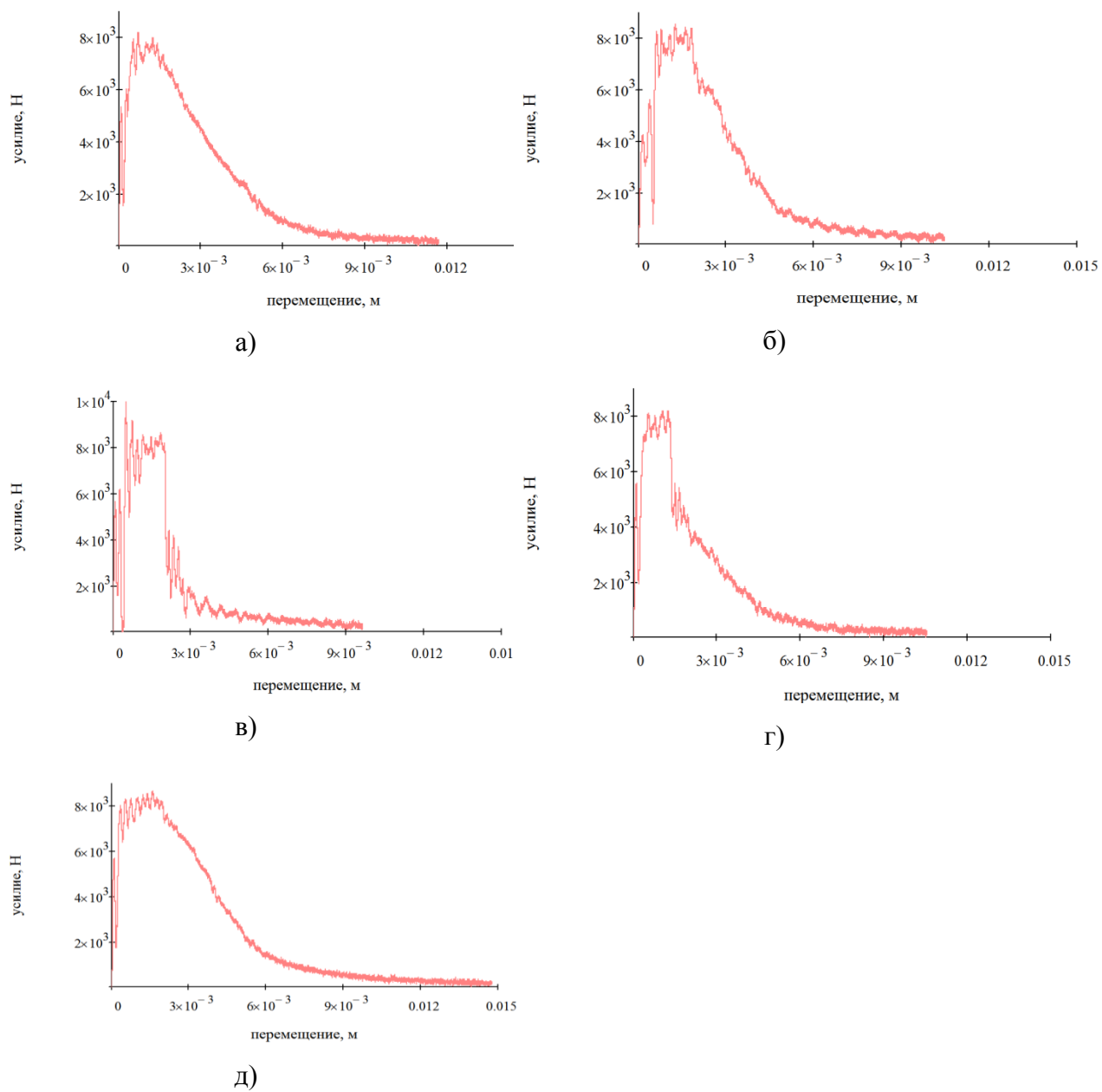
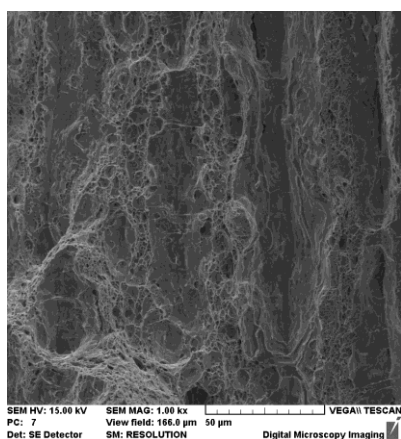
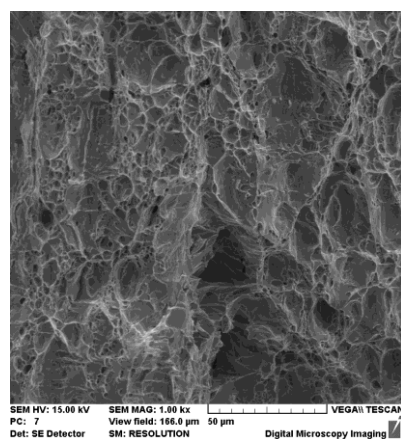


Рис. 11. Диаграммы ударного нагружения образцов из основного металла (ОМ) и околошовной зоны (ОШЗ) при температуре испытаний $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: а – основной металл (ОМ); б – ОШЗ / №1; в – ОШЗ / № 4; г – ОШЗ / № 17; д – ОШЗ / № 18.

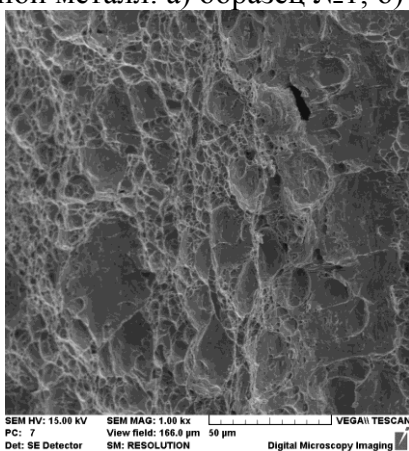


а

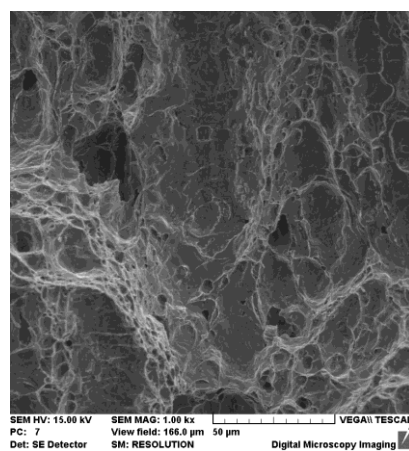


б

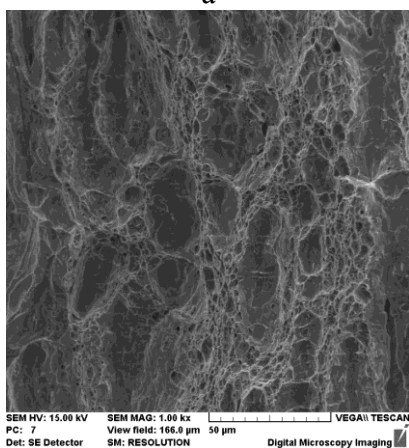
Рис. 12. Фрактограммы изломов образцов после испытания при температуре 20 °С, основной металл: а) образец №1; б) образец № 17.



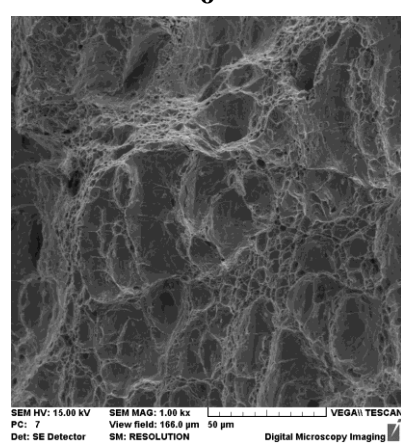
а



б



в



г

Рис. 13. Фрактограммы изломов образцов после испытания при температуре 20 °С, ОШЗ: а) образец №1; б) образец №4; в) образец № 17; г) образец № 18.

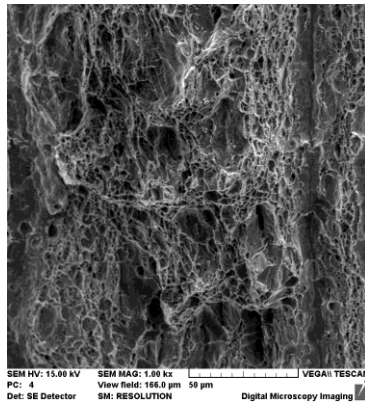
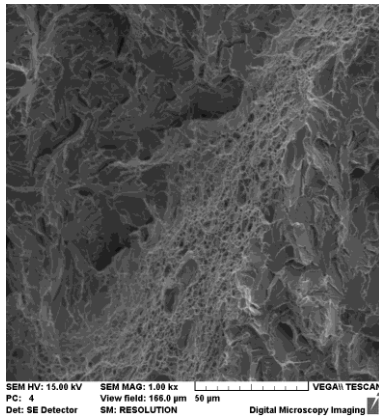
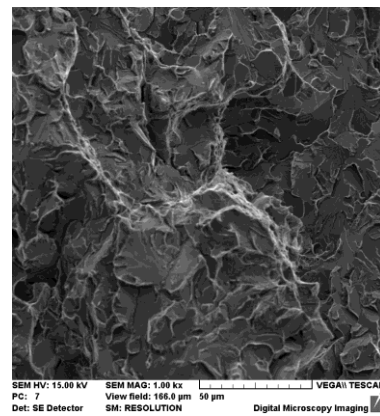


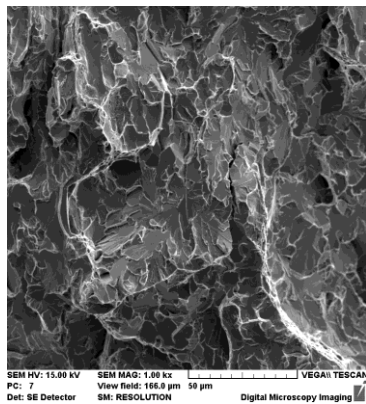
Рис. 14. Фрактограмма излома образца после испытание при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – основной металл.



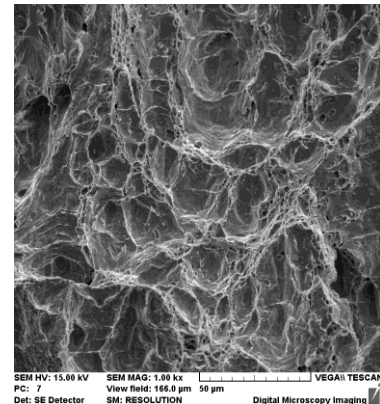
а



б



в



г

Рис. 15. Фрактограммы изломов образцов после испытания на удар при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) – образец №1; б) – образец №4; в) – образец №17; в) – образец №18.

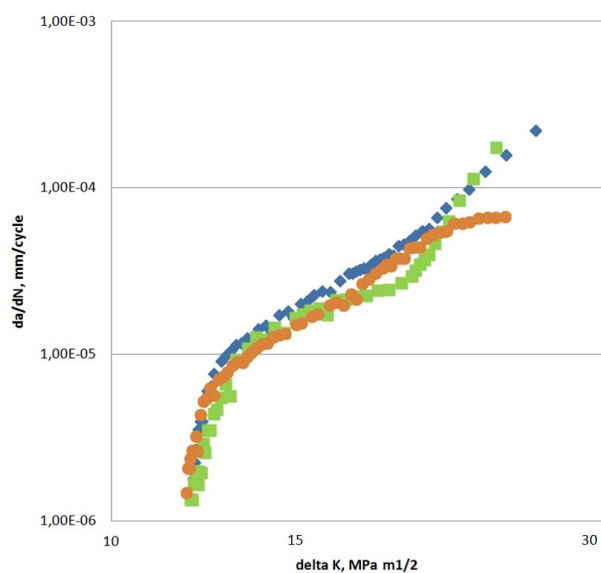


Рис. 16. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения в координатах «скорость роста усталостной трещины – размах коэффициента интенсивности напряжений» для образцов 1-0 (основной металл), 17-1 и 18-1 (ОШЗ).

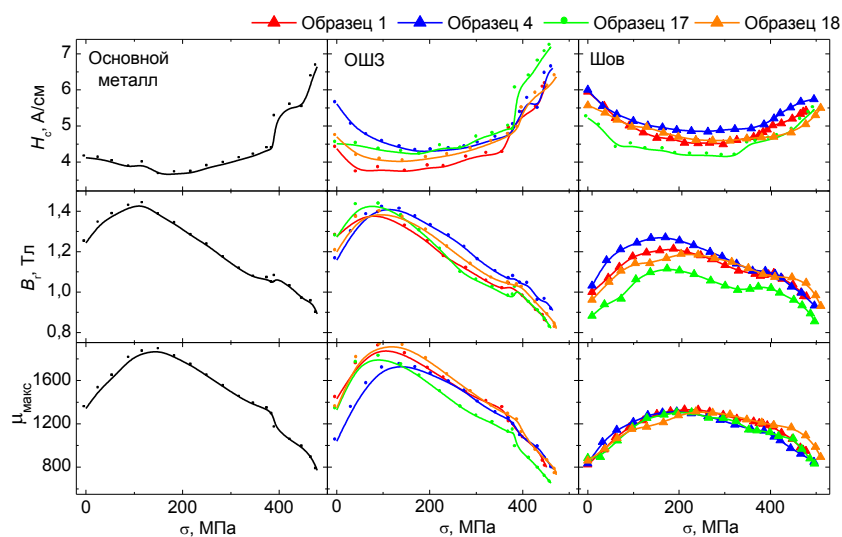


Рис. 17. Изменение магнитных свойств различных зон сварных соединений в зависимости от приложенных растягивающих напряжений.

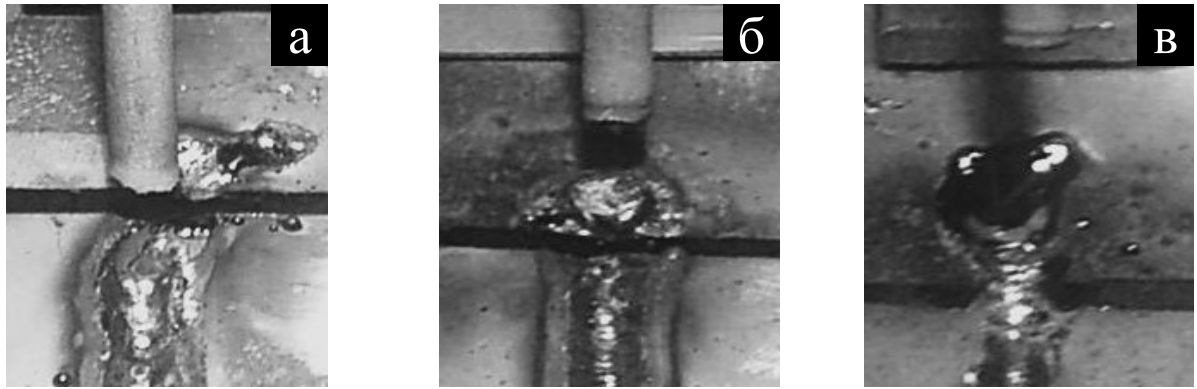


Рис. 18. Влияние рода тока на стабильность процесса сварки в зоне действия поперечного магнитного поля: а) постоянный ток обратной полярности; б) переменный прямоугольный ток ($f=50$ Гц); в) переменный прямоугольный ток ($f=500$ Гц).

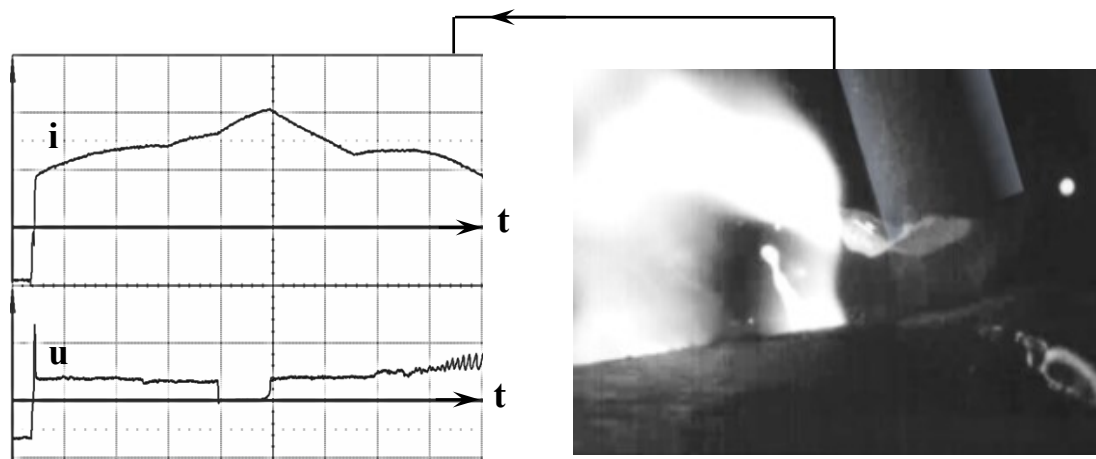


Рис. 19. Особенности горения дуги переменного прямоугольного тока ($f=50$ Гц) и переноса электродного металла в зоне действия поперечного магнитного поля.

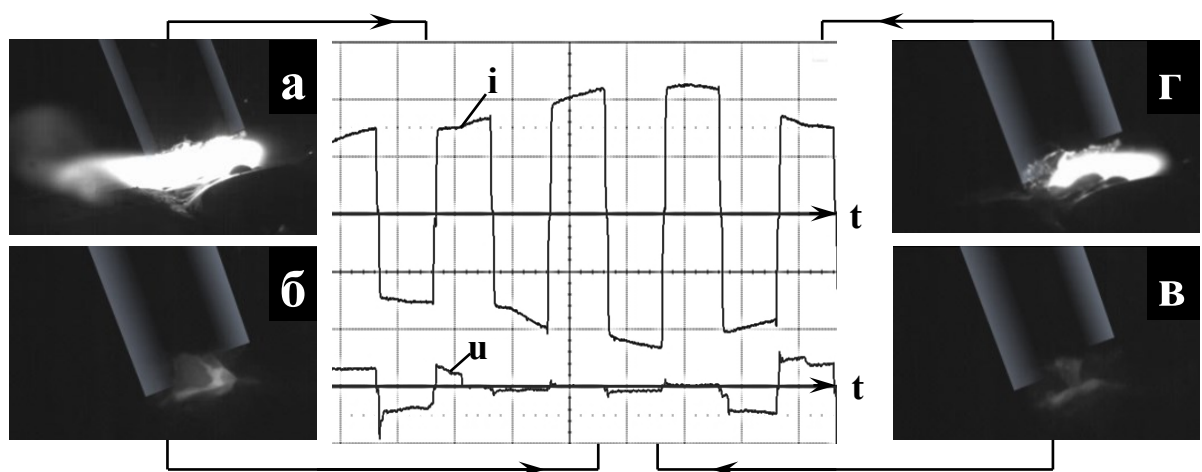


Рис. 20. Особенности горения дуги переменного прямоугольного тока ($f=500$ Гц) и переноса электродного металла в зоне действия поперечного магнитного поля.