

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность(профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему: Оценка свариваемости контактной точечной сваркой
листового проката DP600.

Студент

Е.В. Маркин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент Г.М. Короткова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

руководитель

Консультант

главный специалист Л.Н. Русяева

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Содержание

Введение.....	3
1 Особенности сварных соединений из листового оцинкованного проката DP600.....	6
1.1 Свойства листового стального горячеоцинкованного проката DP600.....	6
1.2 Дефекты неразъемных соединений при контактной точечной сварке по стандартам EN ISO 18278-2 2016	17
2 Разработка методики исследований влияния параметров режима контактной точечной сварки на механические свойства проката DP600	18
2.1 Технология к.т. сварки серии образцов по параметрам стандарта EN ISO 18278-2 2016.....	18
2.2 Технология контактной точечной сварки серии образцов двумя импульсами тока.....	25
2.3 Технология контактной точечной сварки серии образцов с применением термообрабатывающего импульса тока и изменением времени паузы	26
2.4 Методика механических испытаний сварных соединений	30
3 Разработка технологии к.т. сварки проката DP600 и сварка образцов для механических испытаний	33
3.1 Технологии контактной точечной сварки проката DP600.....	33
3.2 Металлографические исследования и замер твердости.....	43
3.3 Сравнительный анализ результатов исследования.....	99
Заключение	104
Список используемых источников.....	105

Введение

В ходе выполнения работы возникла идея реализовать оценку свариваемости с применением дополнительного, термообрабатывающего импульса и какие результаты последуют в зависимости от изменения его величины.

«Основной упор в автомобильной промышленности делается на снижение веса автомобиля, повышение безопасности и ударопрочности при низкой стоимости изготовления деталей» [15], [17], [20]. «По сравнению с традиционными низкоуглеродистыми и высокопрочными низколегированными сталями двухфазные (DP) стали обеспечивают сочетание хорошей формуемости и прочности» [3], [13]. «Двухфазные стали привлекательны для автопроизводителей, так как они могут предложить безопасность, доступность, топливную эффективность и экологичность» [24], [11], [12]. «Ван и др. исследовали поведение высокой степени деформации высокопрочных ДП сталей. Они сообщили, что для испытаний с высокой скоростью деформации, сравнимых с аварийными ситуациями, двухфазные стали разрушаются под действием пластической деформации» [27]. «Микроструктура двухфазной стали состоит из твердых мартенситных частиц, диспергированных в мягкой пластичной ферритовой матрице. Сообщается, что наиболее важным фактором, влияющим на механические свойства двухфазных сталей, является хорошо сбалансированное соотношение между объемными фракциями феррита и мартенсита» [1], [18]. «Другие факторы, влияющие на механическое поведение, включают морфологию мартенситных островков, содержание углерода в мартенсите и состояние деформации феррита, т.е. плотность дислокации» [19], [21].

«Сварка является наиболее важной техникой соединения в автомобильной промышленности, и её состояние играет заметную роль в определении конечных механических свойств соединений. Местное тепловыделение от сварочного электрода вызывает большой температурный градиент на заготовке и может разрушить микроструктуру и, следовательно,

механические свойства сталей» [16]. «Это имеет место, в частности, для двухфазных сталей, которые содержат специфическую ферритно-мартенситную микроструктуру» [23], [14]. Поэтому важно характеризовать развитие микроструктуры во время сварки и ее влияние на конечные механические свойства двухфазных сталей.

«Контактная точечная сварка (КТС) является основным процессом сварки листового металла при изготовлении автомобильных узлов» [29]. «Встроенная инфраструктура делает КТС экономически-целесообразным процессом. Виды разрушения сталей при КТС – это вырыв литого ядра, частичное разрушение и межфазный разрыв, где вырыв литого ядра является предпочтительным, так как во время этого вида разрушения поглощается больше энергии» [25]. «Чжан и др. сообщили, что вид разрушения в первую очередь зависит от размера зоны сплавления, и разрушение имеет тенденцию происходить при режиме извлечения по мере увеличения размера зоны сплавления» [28]. Ма и др. [8] сообщили об образовании усадочных пустот в зоне сплавления при точечной контактной сварке DP600 стали. «Согласно им, эти пустоты образуются благодаря богатому химическому составу двухфазных сталей по сравнению с низкоуглеродистыми сталями» [8].

«Принятие двухфазных сталей в производственных средах было чрезвычайно постепенным, хотя эти стали предлагают очевидные преимущества, и демонстрируют хорошую свариваемость» [26]. [22], [10], [5], [4]. «Однако на автомобильных заводских площадках и в испытательных лабораториях определение свариваемости может отличаться, равно как и испытания и критерии, используемые для отличия "хороших" сварных швов от "плохих". В простейшем из всех испытаний на контроль качества между пластинами, сваренными контактной точечной сваркой вставляют зубило и разрушают сварное соединение; на основе визуального осмотра определяют, пригодны ли сварные точки для использования в транспортных средствах или нет» [9]. «В ранних испытаниях долотом было обнаружено, что сварные точки стали DP600 уступают сварным точкам из традиционных автомобильных

сталей; т.е. non-AHSS (Касательно 1) (например, безмежфазовые стали, низкоуглеродистые стали, повторно фосфоризированные стали, мягкие стали или стали HSLA). Особенно с более толстыми образцами из стали DP600 видно, что сварные точки разрушаются в той же плоскости, что и поверхности листов, вызывая так называемый "межфазный разрыв". Появление межфазных трещин сварного шва в сталях DP600 было контрастом с традиционными автомобильными сталями, где, как известно, разрушение сварной точки происходит последовательно на периферии зоны сплавления, способствуя появлению так называемой "сварочной точки." Чтобы сварные точки были надежными в течение срока службы транспортного средства, они должны проходить испытания на отрыв литого ядра во время контроля качества. Формирование вырыва литого ядра во время контроля качества действительно указывает на то, что одна и та же сварная точка могла бы передавать большую величину разрушающего усилия, вызывая, таким образом, сильную пластическую деформацию в соседних элементах и увеличивая рассеивание энергии деформации в условиях аварии» [30].

Целью выпускной квалификационной работы является оценка свариваемости контактной точечной сваркой листового оцинкованного проката, толщиной 1,2 мм марки DP600.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- а. Изготовить образцы для металлографических исследований и механических испытаний;
- б. Осуществить подбор режимов сварки;
- в. Сварить образцы;
- г. Выполнить механические испытания и металлографические исследования;
- д. Выполнить анализ полученных результатов и дать заключение по работе.

1 Особенности сварных соединений из листового оцинкованного проката DP600

1.1 Свойства листового стального горячеоцинкованного проката DP600

«Классификация сталей, предложенная в проектах ULSAB, рисунок 1.1, учитывает принципиальную технологию производства, соотношение прочностных и пластических характеристик материалов. Известно более десяти типов сталей повышенной прочности. Часть из них относится к группе традиционных CHSS (Conventional High-Strength Steel), которые длительное время успешно применяются в автомобильной промышленности и освоены на многих металлургических предприятиях. Группу прогрессивных улучшенных высокопрочных AHSS (Advanced High-Strength Steel) сталей составляют: DP (Dual Phase steel), CP (Complex Phase steel), TRIP (Transformation Induced Plasticity steel), Mart (Martensitic steel)»[32].

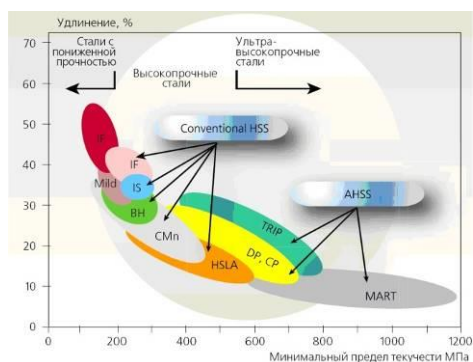


Рисунок 1.1 – Классификация автомобильных сталей

Предметом исследования выступает двухфазная ферритно-мартенситная сталь повышенной прочности DP600+Z140.

«Двухфазные стали - сложные многокомпонентные системы. Они имеют высокие прочностные свойства в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью, повышенным сопротивлением межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением» [31].

«Двухфазные стали, как правило, отличаются от однофазных лучшей свариваемостью. По характеру структурных превращений в области высоких температур, близких к солидусу, их можно подразделить на три основные группы:

- а. стали, в которых в процессе нагрева до температур плавления формируется ферритная структура;
- б. стали, в которых в процессе нагрева до температур плавления формируется аустенитная структура;
- в. стали, сохраняющие двухфазную структуру до температур плавления» [31].

«К первой группе можно отнести стали типа высокохромистых переходного $\alpha + \gamma$ -класса; ко второй — стали типа высоконикелевых переходного $\alpha + \gamma$ -класса и к третьей - стали типа хромоникелевых переходного $\alpha + \gamma$ -класса. Стали рассмотренных групп отличаются по склонности к росту зерна в зоне термического влияния при сварке. Стали первой группы из-за относительно большой подвижности атомов в решетке феррита склонны к росту зерна, стали второй группы менее склонны к росту зерна. Склонность к росту зерна сталей третьей группы зависит от соотношения α - и γ -фаз. До сохранения непрерывных α/γ -границ вторая фаза является непреодолимым препятствием для роста другой фазы. Поскольку с повышением температуры нагрева соотношение фаз изменяется, то при уменьшении количества одной из фаз ниже 20—25 % непрерывность α/γ -границ нарушается и создаются условия для роста. Однако и в это случае вторая (убывающая) фаза будет несколько сдерживать рост зерна основной фазы. В зависимости от соотношения хрома и никеля и температуры начала мартенситного превращения двухфазные стали могут относиться к аустенитно-мартенситному, аустенитно-ферритному и мартенситно-ферритному классам. Стали аустенитно-мартенситного и аустенитно-ферритного классов отличаются по температуре начала мартенситного превращения. Аустенитно-мартенситные стали имеют температуру начала мартенситного превращения 60—20 °С; температура

начала мартенситного превращения аустенитно-ферритных сталей лежит в области отрицательных температур» [31].

«Поскольку все двухфазные стали — стали переходных классов и, как следует из диаграммы состояния системы Fe — Cг — Ni, двухфазные области имеют небольшую протяженность, то во всех случаях изменение состава стали в пределах марочного приводит к некоторому изменению соотношения ферритообразующих и аустенитообразующих элементов и, как следствие, соотношения фаз. Это сказывается на свойствах стали и, в частности, на поведении стали при термообработке и сварке» [31].

«Двухфазные стали в большинстве случаев упрочняются за счет дисперсионного твердения. Упрочнение достигается за счет выделения дисперсных фаз, главным образом карбидов из пересыщенного твердого раствора, который получают путем закалки из однофазной области. При этом из-за различия растворимости упрочняющей фазы в аустените и феррите (мартенсите) процессы дисперсионного твердения развиваются только в ферритной (мартенситной) фазе. Последнее вызвано меньшей растворимостью углерода в феррите, что обеспечивает большую степень пересыщения. Возможность изменения соотношения фаз в сочетании с развитием процессов дисперсионного твердения (процессов старения) в некоторых случаях может привести к значительному снижению пластичности стали» [31].

«Подобное изменение свойств стали может наблюдаться в зоне сварного соединения при выполнении многослойных швов или в зоне пересечения швов. При сварке аустенитно-ферритной стали (например, стали 10X20H6МД2Т), содержащей ферритообразующие элементы на верхнем пределе, в околошовной зоне возможно формирование чистой ферритной структуры. При выполнении следующих слоев или при переkreщивании швов развитие дисперсионного твердения в чистоферритной структуре может привести к катастрофическому охрупчиванию металла этой зоны» [31].

«Пластичность металла ферритной зоны можно повысить последующей термообработкой, например, высокотемпературным отпуском, обеспечивающим формирование вторичного аустенита по схеме $\alpha \rightarrow \gamma$. Однако пластичность повысится только в том случае, если в процессе охлаждения не будет превращения вторичного аустенита в мартенсит ($\gamma' \rightarrow M$), а этому, несмотря на аустенитно-ферритный класс стали, будет способствовать обеднение аустенита легирующими элементами при проведении отпуска» [31].

«Положительная особенность двухфазных сталей - пониженная склонность их к межкристаллитной коррозии. Это обусловлено, во-первых, более мелкозернистой структурой и, следовательно, большей протяженностью границ зерен двухфазных сталей по сравнению с однофазными. Благодаря этому снижается концентрация карбидных выделений по границам зерен. Во-вторых, при образовании карбидов на γ/δ -границе вследствие более высокой концентрации хрома в феррите и повышенной скорости диффузии легирующих элементов в феррите облегчается выравнивание химического состава в приграничных слоях. В-третьих, выделяющиеся по границам зерен карбиды не образуют сплошной сетки, а формируются преимущественно по γ/δ -границам. Формированию карбидов в области γ/δ -границ способствует перераспределение углерода между фазами с преимущественной концентрацией углерода в аустените вблизи границы раздела γ/δ » [31].

«По сравнению с конструкционными низколегированными высокопрочными сталями (HSLA), имеющими аналогичное значение предела текучести, DP-стали демонстрируют более высокую скорость начального деформационного упрочнения, более высокое относительное удлинение и предел прочности, а также меньшее отношение σ_t/σ_b . Величина временного сопротивления DP-сталей достигает 1000 Н/мм² (DP 700/1000). В DP-сталях углерод обеспечивает формирование мартенситной фазы и в комплексе со сбалансированными добавками Mn, Cr, Mo, V и Ni — их прочностные свойства. Состав двухфазных сталей очень разнообразен, например, состав

горячекатаной стали напрямую связан с технологическими возможностями оборудования: чем больше возможности охлаждения на отводящем рольганге стана и ниже возможная температура скотки, тем ниже может быть содержание легирующих элементов. Высокая способность к деформационному упрочнению обуславливает хорошее перераспределение напряжений и, следовательно, штампуемость. Предел текучести готовой детали существенно выше, чем исходной заготовки. Высокие конечные механические свойства обеспечивают высокую усталостную прочность и высокую способность к поглощению энергии, давая возможность использовать их в конструктивных элементах и элементах крепления. Однако для изготовления многих деталей автомобиля требуется очень высокопрочный металл (например, крепление дверей и др.), хотя они имеют простую форму. Вследствие этого их деформация в процессе производства недостаточна для получения преимуществ двухфазной стали. Для этого разработаны двухфазные стали широкого диапазона прочности: DP 450, 500, 600, 780, 980, 1180 при повышенной деформируемости. Здесь основная идея — повышение прочности с увеличением объемной доли мартенсита. Стали производятся в холоднокатаном и горячекатаном (DP 600) состояниях» [33].

«Ряд исследователей предложили метод визуального наблюдения образования литого ядра с использованием высокоскоростной фотографии для эффективного решения таких задач. В исследовании Уптегрува и др., был использован специально обработанный электрод в высокоскоростном фотографическом анализе, с помощью которого был объяснен и сравнен процесс образования литого ядра на листе с покрытием листе с процессом металле без покрытия. В последующем исследовании, была использована более совершенная система освещения для изучения влияния предварительного нагрева и постнагрева на образование литого ядра с помощью высокоскоростной кинематографии. В этом исследовании ток предварительного нагрева использовался для индуцирования образования литых ядер определенного размера, чтобы определить способ повышения

качества сварной точки. Ким и др. использовал систему мониторинга инфракрасного излучения для изучения изменения температуры и теплопередачи в сварной точке, а также параметров, влияющих на формирование ядра. Хотя в предыдущих исследованиях было отмечено влияние явления образования ядра и влияния тока на качество сварной точки, они не приняли во внимание корреляцию между образованием ядра и параметрами процесса, измеренными во время процесса сварки»[2].

«Результаты высокоскоростного камерного мониторинга используются в данном исследовании для изучения не только процесса образования и роста литого ядра, но и взаимосвязи между технологическим параметром и процессом образования ядра, что приводит к визуальному пониманию физического смысла динамического сопротивления и механизма образования ядра. Ряд исследователей экспериментировали с возможностями взаимосвязи между различными технологическими параметрами и ростом сварной точки. В ранних исследованиях, электронно-лучевой осциллограф был использован для записи измеренного аналогового сигнала и расчета динамического сопротивления по графику. Джонсон и др. наблюдали сигнал перемещения электрода в соответствии с расширением сварной точки и исследовали влияние сигнала на качество сварной точки, в то время как Сэведж и др. и Дикенсон и др. рассматривали силу сжатия электродов, состояние поверхности сварной точки, сварочный ток, сварочное напряжение, динамическое сопротивление и тепловую энергию, поступающую от процесса контактной точечной сварки, чтобы наблюдать образование сварной точки. В последнем исследовании наблюдалось влияние образования ядра на динамическое сопротивление и соответствующие закономерности сопротивления, что эффективно объясняло изменение динамических закономерностей сопротивления в зависимости от стадий образования ядра, включая спад контактного сопротивления, повышение температуры поверхности сборки, плавление и пластическую деформацию. С развитием измерительных приборов и технологий предлагаются различные системы

динамического контроля параметров в дополнение к динамическому сопротивлению. В недавних исследованиях была разработана новая система мониторинга динамического сопротивления на основе контроллера для систем, таких как автомобильные производственные линии. На основании вышеизложенных исследований с помощью цифровой высокоскоростной камеры была прослежена связь между механизмом образования ядра и соответствующим технологическим параметром» [2].

«В настоящее время автопроизводители вынуждены учитывать экологическое требования о необходимости снижения общего веса транспортных средств. С другой стороны, ожидается, что они будут производить автомобили с высокой прочностью и лучшей защитой в случае аварии. Поэтому необходимо разрабатывать новые материалы, позволяющие снизить вес и укрепить конструкцию. Используются тонкие стальные листовые сборки с различной толщиной, оптимизирующей каждую часть сборки, и сталевары разрабатывают марки стали с хорошим компромиссом между механической прочностью и пластичностью, а именно усовершенствованную высокопрочную сталь (AHSS). Однако так называемое третье поколение этих сталей имеет различные физико-металлургические характеристики (теплопроводность, прокаливаемость и др.), что может помешать обычным сварочным процессам. Кроме того, при целенаправленном использовании улучшенных высокопрочных сталей в конструкциях транспортных средств конструкторам часто приходится соединять различные марки стали вместе, что соответствует неоднородной сварочной ситуации» [6].

«При механических испытаниях гетерогенных сварных швов высокопрочных AHSS-сталей могут наблюдаться сложные режимы разрушения в дополнение к обычному вытягиванию сварной точки и полным или частичным межфазным разрушением. А именно, иногда наблюдаются дополнительные ситуации, такие как частичные или полные вырывы точки (PDF или TDF, режим AWS 3), соответствующие разрушению вдоль границы раздела между зоной теплового воздействия (ЗТВ) и зоной плавления (ЗП).

Они соблюдаются в соответствии с обычными стандартами для определения свариваемости. В этих стандартах испытания на поперечное растяжение и растяжение на сдвиг в основном используются для оценки характеристик сварного шва. Эти типы разрушения обычно происходят с усилием ниже, чем ожидалось. Поверхность выглядит как слабое место, и такие режимы разрушения могут быть отклонены автопроизводителями, даже если несущая способность остается выше указанного критерия» [6].

«Известно, что геометрические параметры сварных соединений непосредственно влияют на их механические характеристики. Среди этих параметров диаметр сварной точки и соответствующая толщина листа являются одними из наиболее важных и сильно влияют на механическое поведение точечных сварных швов. Многие авторы используют их непосредственно для выражения прочности точечного шва. Другие настаивают также на роли микроструктуры стали в зоне точечной сварки. Размер сварочной точки является, по сути, основным изменяющимся параметром с увеличением интенсивности сварочного тока при определении диапазона сварки для заданной конфигурации листа. Некоторые авторы (например, Чао и другие) сосредоточились на изменении типа разрушения с увеличением диаметра сварного шва, предложив простые аналитические соотношения, выражающие переход от межфазного разрушения к вырыву тела ядра. Однако эти простые соотношения обычно не позволяют предсказать режим разрушения при рассмотрении гетерогенных конфигураций» [6].

«Точечная свариваемость сталей обычно оценивается в лабораториях с использованием однородной сварки (идентичные стальные листы свариваются вместе), в то время как гетерогенная сварка, по сути, является распространенной ситуацией в автомобильной промышленности. Исследование этого может стать серьезной проблемой из-за количества возможных комбинаций стальных листов.

Однако такие исследования необходимы для глобального контекста оптимизации структуры транспортного средства, представленного выше. Как

следствие, начиная с 2000-х годов, ряд исследований был посвящен сварке высокопрочных сталей и их гетерогенным конфигурациям.

В этом контексте можно выделить несколько выводов: частое существование критического диаметра ядра для изменения типа разрушения (в зависимости от толщины листа); тот факт, что тип разрушения точечных сварных соединений не является характеристикой их прочности; и положительное отклонение усилия поперечного растяжения (CTS), наблюдаемое для различных конфигураций точечной сварки высокопрочной AHSS-стали.

Среди этих исследований большинство было получено при растяжении сдвигом, гораздо меньше - при поперечном растяжении (например, Хан, Биро) и, насколько известно авторам, ни одно не рассматривало одновременно эти два взаимодополняющих режима нагружения на одних и тех же гетерогенных точечных сварных швах» [6].

В исследовании использовался листовый холоднокатанный прокат двухфазной горячеоцинкованной стали марки DP600+Z140 толщиной 1.2 мм по ТС 14-101-683-2008.

В таблицах 1.1-1.3 приведен результаты химического анализа основы листового проката, результаты химического анализа цинкового покрытия и механические свойства листового проката DP600+Z140 толщиной 1.2 мм. Далее на рисунках 1.2 – 1. приведены внешний вид листового проката, его морфология поверхности, микроструктура поперечного сечения проката DP600+Z140 и поперечное сечение покрытия листового проката.

Таблица 1.1 – Результаты химического анализа основы проката DP600+Z140 1.2 толщиной мм

Обозначение и требования	Содержание элементов, %														Марка по составу
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	V	Al	B	Cu	Ni	Fe	
DP600	0,067	0,249	1,58	0,009	0,005	0,47	0,122	отс	0,011	0,040	отс	0,054	0,043	осн	DP600

TC 14-101-683- 2008	Н.б. 0,12	Н.б. 1,0	Н.б. 1,7	Н.б. 0,015	Н.б. 0,015	Cr+Mo Н.б. 1,0	Nb+V Н.б. 0,07	0,015- 0,070	Н.б. 0,005	Не норм	осн	DP600
---------------------------	--------------	-------------	-------------	---------------	---------------	-------------------	-------------------	-----------------	---------------	---------	-----	-------

Таблица 1.2 – Результаты химического анализа цинкового покрытия проката DP600+Z140 толщиной 1.2 мм

Номер образца	Содержание элементов, %							
	Fe	Al	Si	Pb	Sb	Bi	Ni	Zn
1193/151-6Ц	0,44	0,40	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	основа

Таблица 1.3– Результаты механических испытаний проката DP600+Z140 толщиной 1.2 мм в поперечном направлении

Номер образца и требования	Толщина, мм	Rp _{0,2} , МПа	Rm, МПа	A _g , %	A ₈₀ , %	n (10%-A _g)	r (A _g)
1	1,203	392	642	15,4	22,1	0,156	1,081
2	1,195	395	641	15,7	23,8	0,156	1,237
3	1,186	398	646	15,5	23,6	0,156	1,226
Среднее	1,195	395	643	15,5	23,2	0,156	1,181

Примечание: Предел текучести условный Rp_{0,2}; Временное сопротивление Rm; Относительное равномерное удлинение A_g; Относительное удлинение после разрыва A₈₀ Коэффициент пластической анизотропии r_{A_g}; Показатель деформационного упрочнения n_(10%-A_g)



Рисунок 1.2 – Внешний вид образца проката марки DP600+Z140 толщиной 1.2 мм

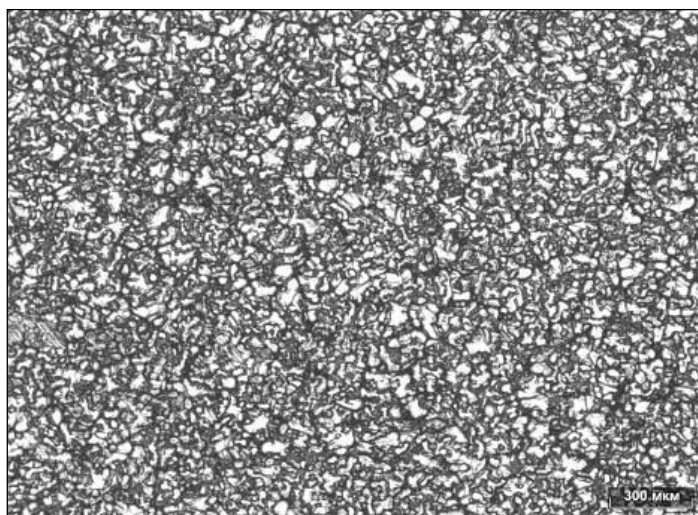


Рисунок 1.3 – Морфология поверхности образца проката DP600+Z140
толщиной 1.2 мм

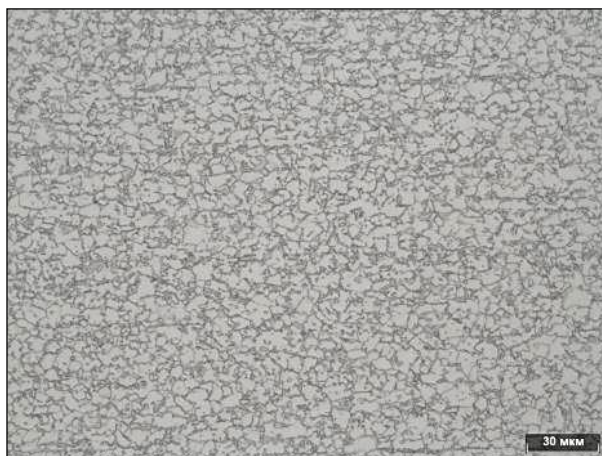


Рисунок 1.4 – Микроструктура поперечного сечения образца проката
DP600+Z140 толщиной 1.2 мм



Рисунок 1.5 – Поперечное сечение цинкового покрытия проката
DP600+Z140 толщиной 1,2 мм

1.2 Дефекты неразъемных соединений при контактной точечной сварке по стандартам EN ISO 18278-2 2016

По технологии представленной в АО «АвтоВАЗ» сварка производится на контактных сварочных машинах. Параметры режима контактной точечной сварки, а именно: сварочный ток, длительность импульса, длительность выдержки и величина прикладываемого усилия заданы стандартом EN ISO 18278-2 2016. Стандартом установлены жесткие требования к соблюдению указанных режимов. Однако, в зоне термического влияния и литом ядре возникают дефекты снижающие механические свойства сварного соединения. К таким дефектам относятся: поры, раковины, непровары, рисунки 1.6-1,7.

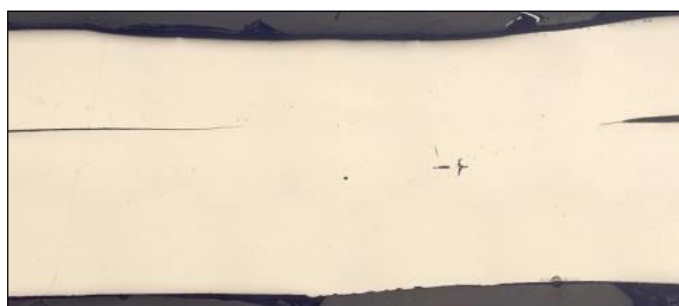


Рисунок 1.6 – Поры и непровар



Рисунок 1.7 – Раковина, непровары и трещины с поверхности

Заключение по разделу

Выполнен анализ источников информации о применяемых типах проката в современном машиностроении.

Выполнен химический анализ исследуемого проката. Выполнен химический анализ цинкового покрытия исследуемого проката.

В ходе исследования установлено соответствие химического состава стали и покрытия требуемым стандартам.

2 Разработка методики исследований влияния параметров режима контактной точечной сварки на механические свойства проката DP600

2.1 Технология к.т. сварки серии образцов по параметрам стандарта EN ISO 18278-2 2016

Для подготовки образцов требуемых размеров, сварки и механических испытаний применялось сварочное, оборудование для механических испытаний и заготовительное оборудование, а так же оснастка и измерительные приборы.

«Машина контактной точечной сварки МТ-4021 УХЛ4, изображенная на рисунке 2.1, предназначена для точечной сварки переменным током деталей из низкоуглеродистых и легированных сталей. Технические характеристики машины контактной точечной сварки МТ-4021 УХЛ4 представлена в таблице 2.1» [32].

Таблица 2.1 – Технические характеристики контактной сварочной машины МТ-4021 УХЛ4

Технические характеристики	Единицы измерения	МТ-4021 УХЛ4
Напряжение питания частотой 50Гц, однофазное	В	380

Продолжение таблицы 2.1

Наибольшая мощность при коротком замыкании	кВА	420
Мощность при ПВ=50%	кВА	150
Наибольший вторичный ток	кА	40
Номинальный длительный ток	кА	10
Наибольшее усилие сжатия	даН	1900
Вылет	мм	500
Раствор	мм	150...300
Максимальный ход верхнего электрода	мм	100
Свариваемые толщины: — низкоуглеродистая сталь — нержавеющая сталь — титановые сплавы — алюминиевые сплавы — медные сплавы (латуни) — арматура класса А1, В1 — арматура класса А2, В3	мм	от 0,5 + 0,5 до 8,0 + 8,0 от 0,5 + 0,5 до 5,0 + 5,0 от 0,5 + 0,5 до 5,0 + 5,0 от 0,3 + 0,3 до 1,7 + 1,7 от 0,5 + 0,5 до 1,5 + 1,5 от 5,0 + 5,0 до 32 + 32 от 5 + 5 до 18 + 18
Тип регулятора		РКС-16
Регулирование сварочного тока		ступенчатое и фазовое



Рисунок 2.1 – Контактная сварочная машина МТ4021

«Электроды 0821-4403. Материал электродов БрХ1Цр ТУ48-21-5050-82. Диаметр рабочей поверхности 8 мм» [32].

«Регулятор РКС-16 изображен на рисунке 2.2» [32].

«Основные технические характеристики регулятора типа РКС - 16:

- а. напряжение питания (380 + 5%, - 10%)В;
- б. потребляемая мощность не более 60ВА;
- в. отклонение действующего значения сварочного тока от заданного при колебаниях напряжения питающей сети от 0,9 до 1,05 номинального значения не более - +/- 3%» [32];
- г. «пределы регулирования выдержек времени сварочного цикла для регуляторов типов РКС - 16 и РКС - 16Ш, полупериодов сети:
- д. «Сжатие 1» - (2 - 254), «Сжатие 2» - (2 - 254), «Модуляция» - (0 - 99), «Нагрев 1» (СВ1) - (1 - 99), «Проковка 1» - (0 - 99), «Нагрев 2» (СВ2) - (0 - 255 , «Проковка 2» - (0 - 254), «Пауза 1» - (2 - 254), «Задержкаковки» - (0 - 254)» [32];

е. диапазон задаваемых значений $\cos \varphi - (0, 2 \dots 0, 8)$ » [32].



Рисунок 2.2 – Регулятор РКС-16

«Для измерения величины сварочного тока и времени сварки применяется сварочный тестер МІУАСНІММ-315В, изображенный на рисунке 2.3» [32].



Рисунок 2.3 – Сварочный тестер МІУАСНІММ-315В

«Кондуктор для позиционирования сварных образцов изображен на рисунке 2.4. Кондуктор выполнен из изоляционного материала» [32].



Рисунок 2.4 – Кондуктор для позиционирования сварных образцов

«Машина испытательная универсальная TIRAtest 2300, представленная на рисунке 2.5, (далее - машина) предназначена для измерений силы и деформации образцов (деталей) из различных материалов при механических испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб» [32].

«Технические характеристики машины испытательной универсальной TIRAtest2300 представлены в таблице 2.2» [32].

Таблица 2.2 – Технические характеристики машины испытательной универсальной TIRAtest2300

Наименование параметра	Значение
1	2
Наибольшая предельная нагрузка, кН (тс)	98 (10)
Пределы допускаемой относительной погрешности при измерении силы, %	$\pm 1,0$
Максимальная скорость перемещения подвижной траверсы, мм/мин:	
- ступень передачи G2	100 \pm 2
- ступень передачи G3	14,5 \pm 0,29
Высота рабочего пространства (без зажимного приспособления внизу), мм	1050
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении перемещения подвижной траверсы в диапазоне от 0 до 100 мм включительно, мм	$\pm 0,10$
Пределы допускаемой относительной погрешности при измерении перемещения подвижной траверсы в диапазоне от 100 до 1000 мм, %	$\pm 1,0$

Продолжение таблицы 2.2

Диапазон измерений деформации образцов (деталей) (измерительная головка Т1/2000), мм	0-1,0
1	2
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении деформации образцов (деталей) (измерительная головка Т1/2000), мм	±0,010
Габаритные размеры (высота x ширина x длина), мм, не более:	
- устройство нагрузки	900*1160x2190
- пульт управления	1460*725*800
Масса, кг, не более:	
- устройство нагрузки	715
- пульт управления	100
- температура окружающей среды, °С	18-25
- относительная влажность воздуха, %, не более	80
- напряжение, В	220±10 %
- частота, Гц	50±2
Потребляемая мощность, кВт, не более	6,6
Срок службы, лет, не менее	15



Рисунок 2.5 - Машина испытательная универсальная TIRAtest 2300

«Кривошипные листовые ножницы (гильотинные) с наклонным ножом НК3418 изображены на рисунке 2.6 и предназначены для холодной резки листового материала с пределом прочности $\sigma_{BP} \leq 500$ МПа (50 кгс/мм²) и с наибольшими размерами поперечного сечения 6,3 x 2000 мм. Возможна резка

неметаллических листовых материалов, исключая быстрое затупление режущих кромок ножей и растрескивание вырезаемой заготовки» [32].



Рисунок 2.6 - Кривошипные листовые ножницы (гильотинные) с наклонным ножом НК3418

«Для измерения геометрических параметров сварных точек применяется штангенциркуль электронный SKRAB40360, изображенный на рисунке 2.7» [32].



Рисунок 2.7 – Штангенциркуль электронный SKRAB40360

«Динамометр LBIET-4030 Предназначен для измерения усилия сжатия электродов. Диапазон измерения 0-10000 Н. Погрешность измерений ± 150 Н» [32].

Для сварки образцов с целью определения требуемого диапазона свариваемости по EN ISO 18278-2 2016 подобраны параметры согласно стандарта EN ISO 18278-2 2016 – рисунок 2.8, таблица 2.2.

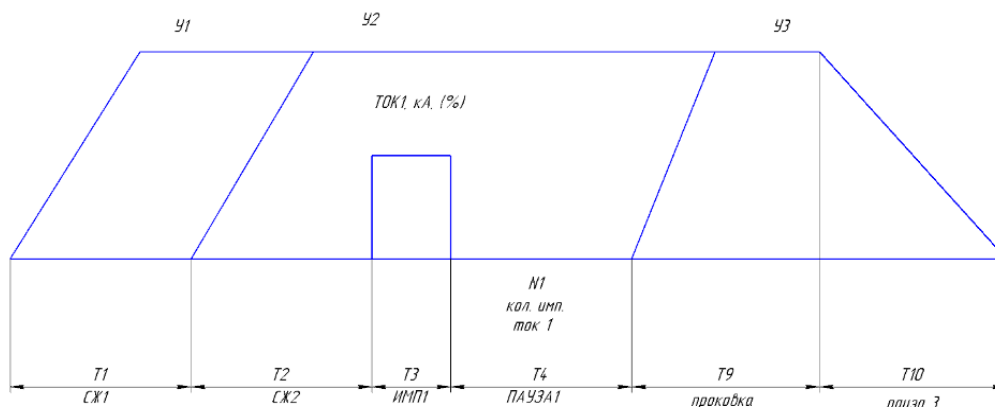


Рисунок 2.8 – Циклограмма режима контактной сварки для оценки диапазона свариваемости по EN ISO 18278-2 2016

Таблица 2.2 – Параметры режима контактной точечной сварки, согласно EN ISO 18278-2 2016

Наименование параметра режима сварки	Единицы измерения	Величина параметра режима
У1, У2 – усилие предварительного сжатия, усилие сжатия	кН	5,0 ± 0,15
Т1, Т2 – время сжатия	пер.	40
Т3 - Время сварки	пер.	10
Т4 - Время паузы	пер.	2
Т9 - Время выдержки	пер.	15
Т10 – Время паузы 3	пер.	60
Н1 - Количество импульсов	ед.	3

2.2 Технология контактной точечной сварки серии образцов двумя импульсами тока

Для оценки влияния наличия второго сварочного импульса на рисунке 2.9 и в таблице 2.3 приведен режим с применением дополнительного сварочного импульса.

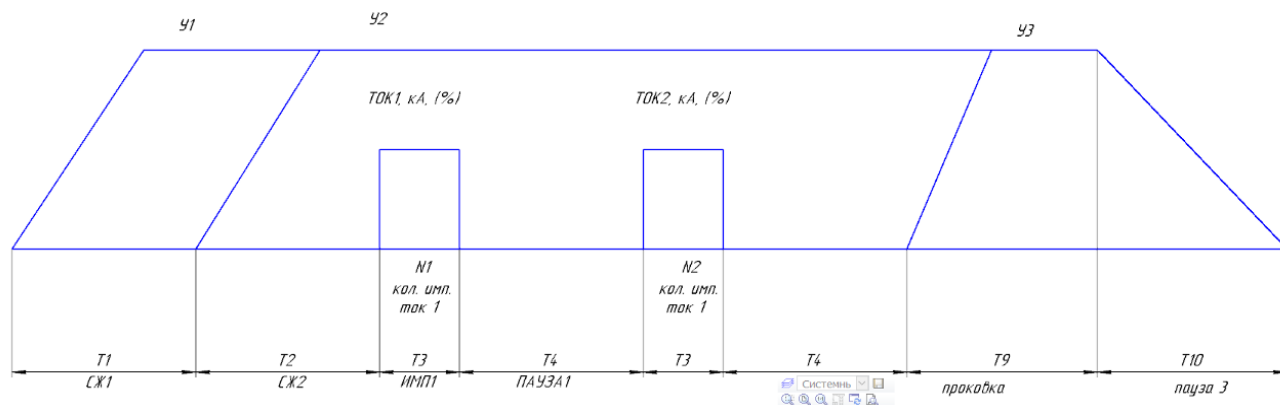


Рисунок 2.9 – Циклограмма процесса контактной точечной сварки с применением дополнительного сварочного импульса

Таблица 2.3 – Параметры режима контактной точечной сварки с применением дополнительного сварочного импульса

Наименование параметра режима сварки	Единицы измерения	Величина параметра режима
U_1, U_2 – усилие предварительного сжатия, усилие сжатия	кН	$5,0 \pm 0,15$
T_1, T_2 – время сжатия	пер.	40
ТОК1 – Величина первого сварочного импульса	кА	8
T_3 - Время приложения 1 импульса	пер.	16
T_4 - Время паузы	пер.	2
T_9 - Время выдержки	пер.	13
T_{10} – Время паузы 3	пер.	60
N_1 - Количество импульсов	ед.	3
ТОК2 – Величина второго сварочного импульса	кА	8
T_3 – Величина второго импульса	пер	16

2.3 Технология контактной точечной сварки серии образцов с применением термообрабатывающего импульса тока и изменением времени паузы

Для оценки влияния на сварное соединение изменения времени паузы между импульсами подобран и приведен режим сварки в таблице 2.4 и на рисунке 2.10.

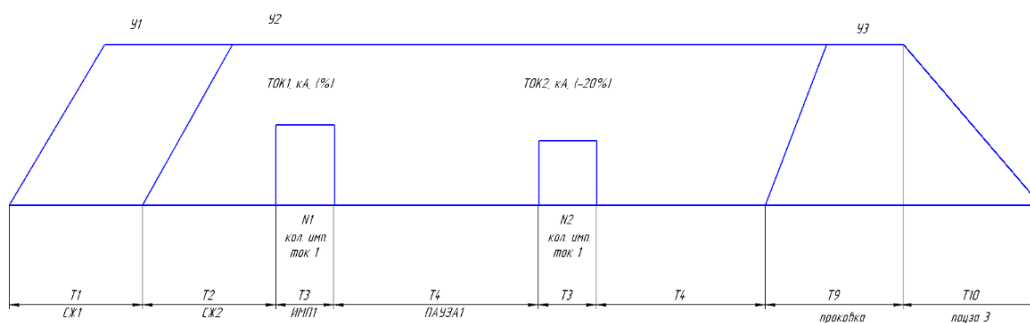


Рисунок 2.10 – Циклограмма процесса контактной точечной сварки с применением термообрабатывающего импульса и изменением времени паузы

Таблица 2.4 – Параметры режима сварки с применением термообрабатывающего импульса и изменением времени паузы между импульсами

Наименование параметра режима сварки	Единицы измерения	Величина параметра режима
У1, У2 – усилие предварительного сжатия, усилие сжатия	кН	5,0 ± 0,15
T1, T2 – время сжатия	пер.	40
ТОК1 – Величина первого сварочного импульса	кА	8
T3 - Время приложения 1 импульса	пер.	16
T4 - Время паузы	пер.	2; 6; 10; 14; 18
T9 - Время выдержки	пер.	13
T10 – Время паузы 3	пер.	60
N1 - Количество импульсов	ед.	3

ТОК2 – Величина второго сварочного импульса	кА	6,4
T3 – Величина второго импульса	пер	22

Также для оценки влияния изменения времени дополнительного, термообрабатывающего импульса подобран и приведен режим сварки, изложенный в таблице 2.5 и рисунке 2.11.

Таблица 2.5 – Параметры режима сварки образцов с применением термообрабатывающего импульса и изменением его величины

Наименование параметра режима сварки	Единицы измерения	Величина параметра режима
У1, У2 – усилие предварительного сжатия, усилие сжатия	кН	5,0 ± 0,15
T1, T2 – время сжатия	пер.	40
ТОК1 – Величина первого сварочного импульса	кА	8
T3 - Время приложения 1 импульса	пер.	16
T4 - Время паузы	пер.	2
T9 - Время выдержки	пер.	13
T10 – Время паузы 3	пер.	60
N1 - Количество импульсов	ед.	3
ТОК2 – Величина второго сварочного импульса	кА	6,4
T3 – Величина второго импульса	пер	14; 18; 22; 26; 30

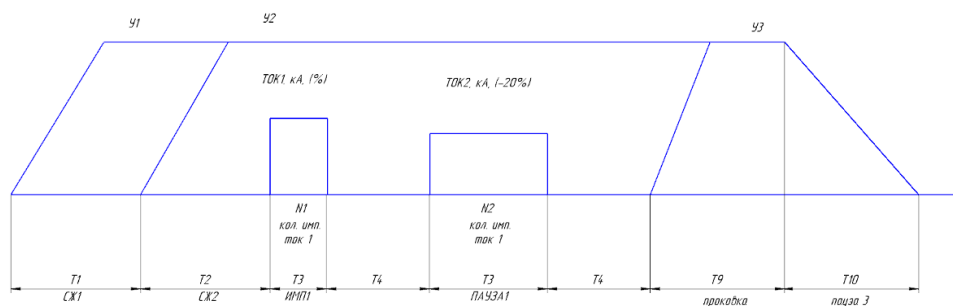


Рисунок 2.11 – Циклограмма параметра режима контактной точечной сварки с изменением времени дополнительного термообрабатывающего импульса

Для проведения оценки влияния дополнительного термообрабатывающего импульса на величину диапазона свариваемости подобран и изложен в таблице 2.6 и на рисунке 2.12 режим контактной точечной сварки.

Таблица 2.6 Параметры режима сварки образцов под определение диапазона свариваемости

Наименование параметра режима сварки	Единицы измерения	Величина параметра режима
У1, У2 – усилие предварительного сжатия, усилие сжатия	кН	5,0 ± 0,15
T1, T2 – время сжатия	пер.	40
ТОК1 – Величина первого сварочного импульса	кА	8
T3 - Время приложения 1 импульса	пер.	16
T4 - Время паузы	пер.	6
T9 - Время выдержки	пер.	13
T10 – Время паузы 3	пер.	60
N1 - Количество импульсов	ед.	3
ТОК2 – Величина второго сварочного импульса	кА	6,4
T3 – Величина второго импульса	пер	14

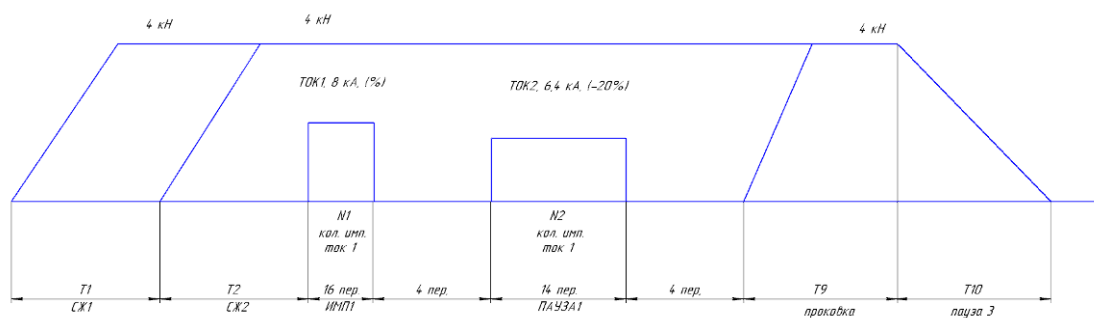


Рисунок 2.12 – Циклограмма параметра режима контактной точечной сварки для определения величины сварочного диапазона

2.4 Методика механических испытаний сварных соединений

После сварки образцы доставляются на участок механических испытаний и металлографических исследований.

«Для проведения оценки свариваемости согласно европейскому стандарту EN ISO 18278-2 2016 необходимо подготовить два вида образцов. Для проведения испытаний на срез необходимы образцы для каждой серии сварки размером 50x100 мм. Для проведения испытаний на отрыв необходимы образцы для каждой серии сварки размером 50x150 мм» [33], (рисунки 2.13 и 2.14).

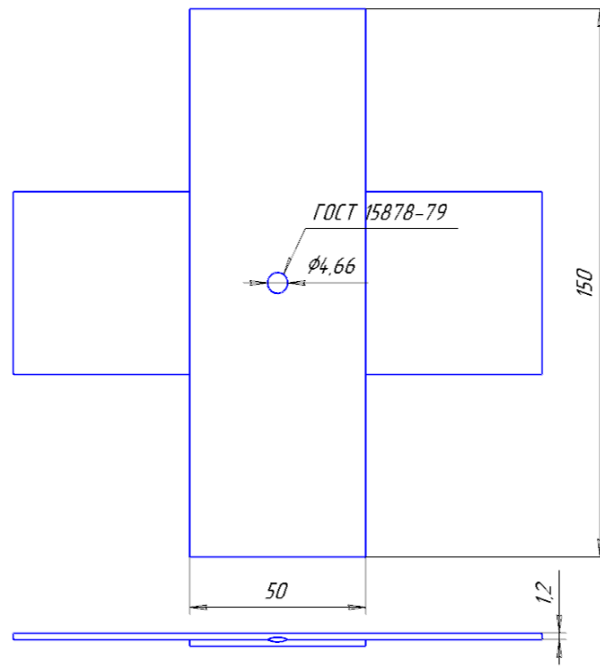


Рисунок 2.13 – Образец для испытаний на отрыв сварной точки

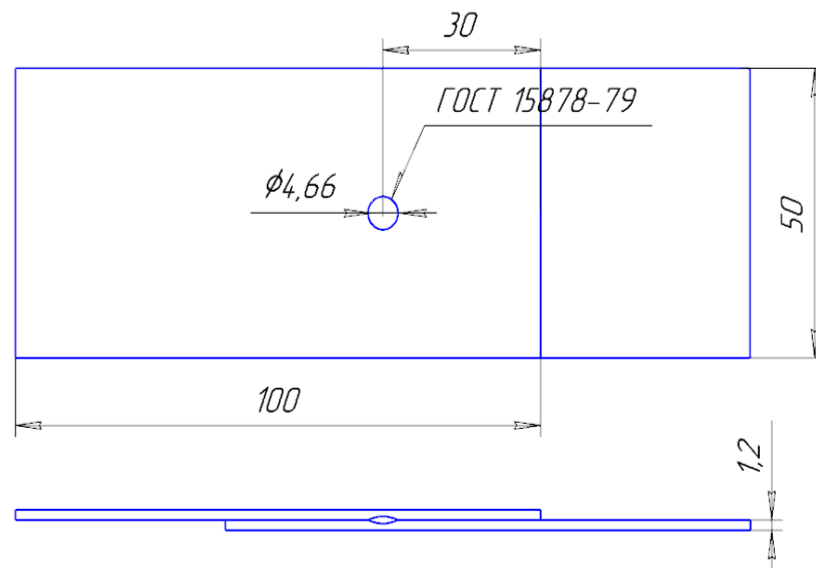


Рисунок 2.14 – Образцы для испытаний на срез сварной точки

В ходе описанных испытаний определяется величина разрушающего усилия сварной точки при испытаниях на срез и отрыв.

Испытания проводятся по ГОСТ 6996-66.

Для проведения металлографических исследований изготавливаются образцы размером 50x150 мм и состоящие из нескольких сварных точек – рисунок 2.10. Во избежание шунтирования сварные точки необходимо проставлять в отдалении не менее чем на 30 мм друг от друга.

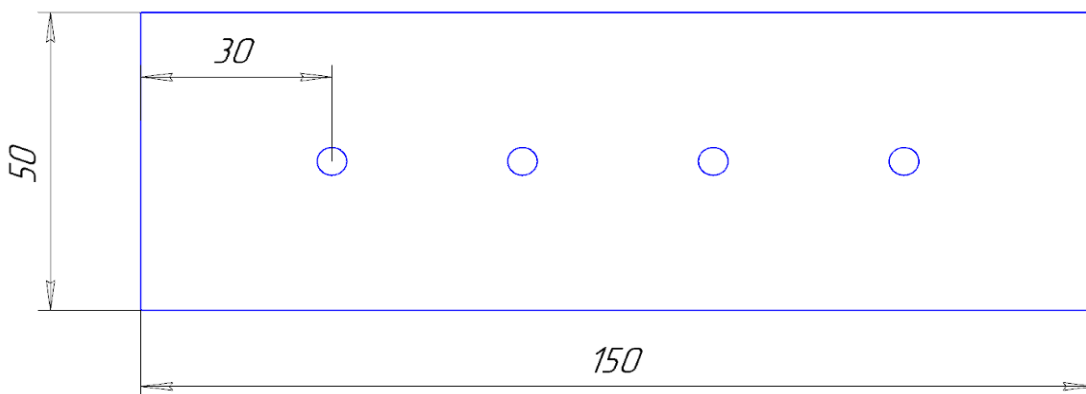


Рисунок 2.15 – Образец для металлографических исследований

Металлографические исследования проводятся по методикам, указанным в таблице 2.3

Таблица 2.7 – Методики исследований

Наименование показателей	НД	Оборудование
Микроструктура, геометрические параметры и дефекты сварных точек	И 37.101.5577-2006	Микроскоп AxioObserver. D1m
Твердость по Виккерсу, HV	ГОСТ 2999-75	Твердомер Micromet-II
Геометрические параметры	-	Микроскоп AxioObserver. D1m

В результате описанных исследований определяется наличие дефектов в сварных точках, определяется их структура, производится замер сварных точек и определяется твердость основного металла, зоны термического влияния, литого ядра и переходных зон.

Заключение по разделу

В ходе выполнения раздела осуществлен подбор оборудования, для проведения сварки и механических испытаний.

Изготовлены требуемые для испытаний и исследований образцы из листового проката, толщиной 1,2 мм марки DP600 с цинковым покрытием.

Осуществлен подбор режимов контактной точечной сварки образцов для исследований.

3 Разработка технологии к.т. сварки проката DP600 и сварка образцов для механических испытаний

3.1 Технологии контактной точечной сварки проката DP600

«В ходе эксперимента по оценке диапазона свариваемости согласно EN ISO 18278-2 2016 были получены результаты оценки прочности сварных точек на срез и отрыв для различных диаметров сварной точки в диапазоне сварочного тока от» [32] 6,6 кА – до 8 кА. Первичные результаты эксперимента представлены в таблицах 3.1 и 3.2. «Построены зависимости: диаметра сварной точки от величины сварочного тока и фактический диапазон величины сварочного тока – рисунок 3.1; величины усилия отрыва при увеличении диаметра сварной точки – рисунок 3.2; величины усилия среза при увеличении диаметра сварной точки – рисунок 3.3» [32].

Для оценки влияния вариации параметров режима контактной сварки проведен эксперимент с применением параметров указанных выше.

Таблица 3.1 – Результаты механических испытаний на отрыв сварных образцов из двухфазной горячеоцинкованной стали DP600+Z140

Среднее значение величины сварочного тока, кА	Среднее значение диаметра сварной точки, мм	Среднее значение величины усилия разрушения, даН	Значение величины сварочного тока, %	Средний диаметр литого ядра сварной точки, мм												Величина усилия разрушения, даН		
				1				2				3				1	2	3
				С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	выплеск	F	F	F
6,5	4,38	465	62	4,35				4,36				4,44				463	486	446
6,6	4,68	466	63	4,66				4,67				4,71				445	475	480
7,0	5,03	578	66	5,02				5,02				5,06				553	569	613
7,5	5,12	690	70	4,79			x	5,01				5,56				463	849	757
8,1	5,38	683	74	5,31				5,34				5,50		x		754	810	485
8,6	5,65	765	78	5,59			x	5,63		x		5,74				696	894	707
8,9	5,77	716	80	5,72			x	5,75		x		5,85		x		747	811	591

Примечание: F_{min} = 422 даН – минимально допустимое усилие отрыва;
D_{min} = 4,66 мм – минимально допустимый диаметр сварной точки

Таблица 3.2 – Результаты механических испытаний на срез сварных образцов из двухфазной горячеоцинкованной стали DP600+Z140

Среднее значение величины сварочного тока, кА	Среднее значение диаметра сварной точки, мм	Среднее значение величины усилия разрушения, даН	Значение величины сварочного тока, %	Средний диаметр литого ядра сварной точки, мм												Величина усилия разрушения, даН		
				1				2				3				1	2	3
				С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	выплеск	F	F	F
6,6	4,37	1059	63	4,30				4,39				4,41				1033	1067	1077
6,9	5,20	1384	66	5,20				5,20				5,22				1371	1396	1386
7,4	5,09	1512	70	4,81				4,89				5,57				1497	1521	1519
8,1	5,53	1420	74	5,46			x	5,53				5,61			x	1319	1541	1401
8,7	5,82	1405	78	5,72			x	5,86			x	5,88			x	1456	1324	1436

Примечание: F_{min}= 932 даН – минимально допустимое усилие отрыва;
D_{min} = 4,66 мм – минимально допустимый диаметр сварной точки

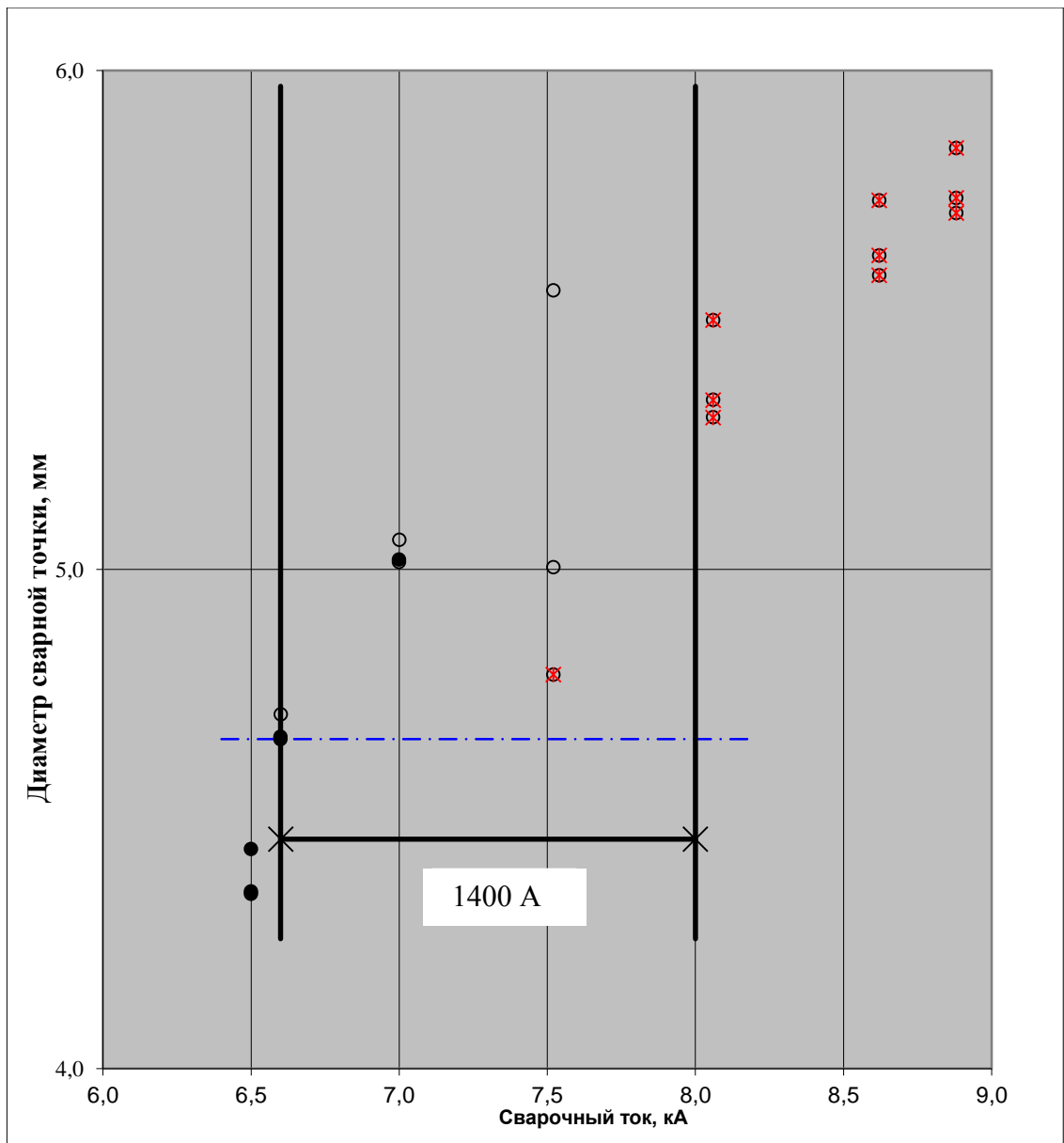


Рисунок 3.1 - Диапазон свариваемости горячеоцинкованного проката марки DP600+Z140 толщиной 1,2 мм.

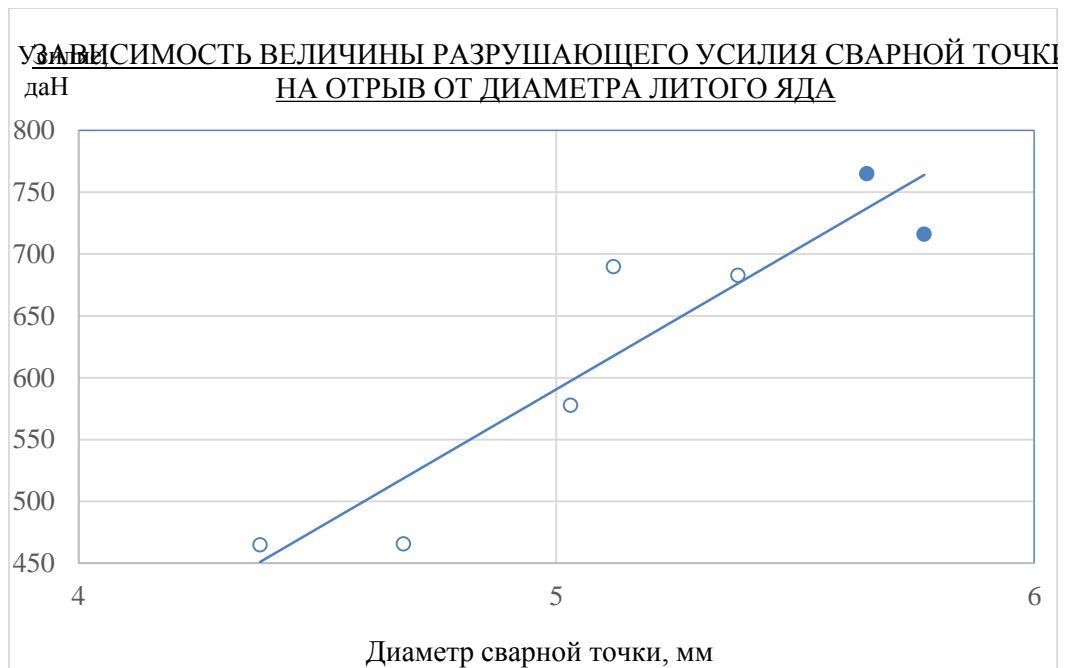


Рисунок 3.2 - Зависимость величины усилия отрыва от диаметра ядра сварной точки

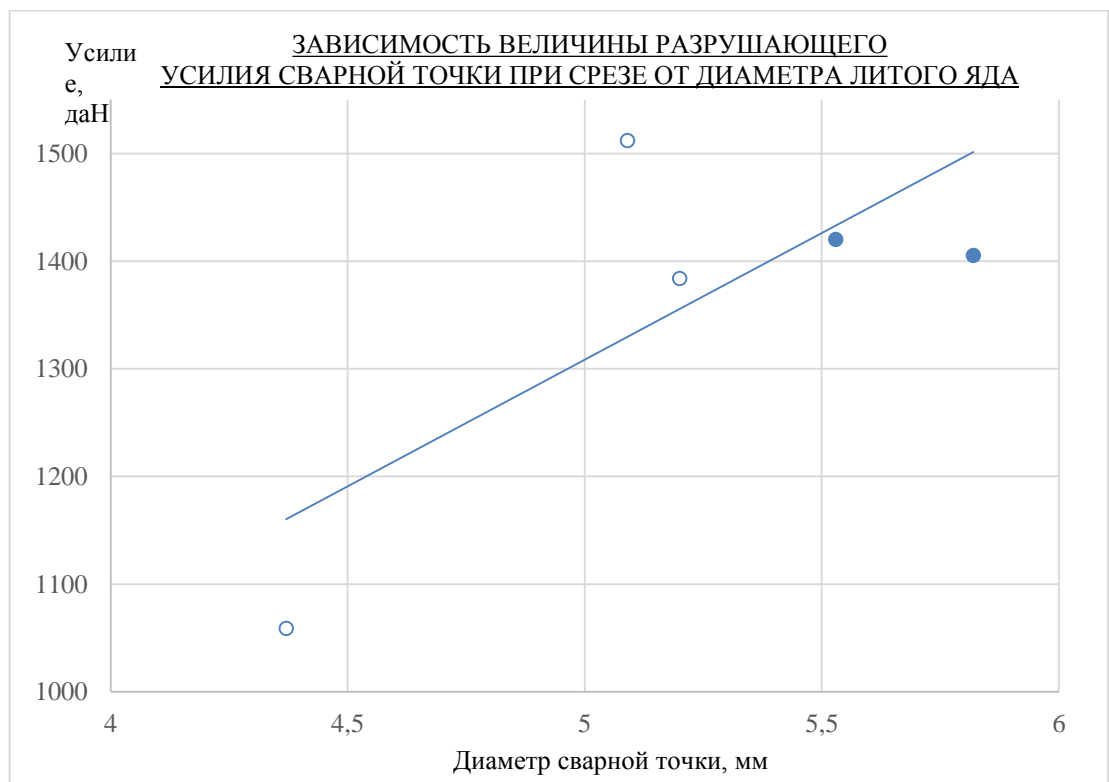


Рисунок 3.3 - Зависимость величины усилия среза от диаметра ядра сварной точки

Для оценки влияния вариации параметров режима контактной сварки проведен эксперимент с применением параметров указанных выше.

«В ходе эксперимента по оценке диапазона свариваемости согласно EN ISO 18278-2 2016 были получены результаты оценки прочности сварных точек на срез и отрыв для различных диаметров сварной точки в диапазоне сварочного тока от» [32] 6,7 кА – до 8,4 кА. «Первичные результаты эксперимента представлены в таблицах 3.3 и 3.4. Построены зависимости: диаметра сварной точки от величины сварочного тока и фактический диапазон величины сварочного тока – рисунок 3.4; величины усилия отрыва при увеличении диаметра сварной точки – рисунок 3.5; величины усилия среза при увеличении диаметра сварной точки – рисунок 3.6» [32].

Таблица 3.1 – Результаты механических испытаний на отрыв сварных образцов из двухфазной горячеоцинкованной стали DP600+Z140 с применением термообрабатывающего импульса

Среднее значение величины сварочного тока, кА	Среднее значение диаметра сварной точки, мм	Среднее значение величины усилия разрушения, даН	Значение величины сварочного тока, %	Средний диаметр литого ядра сварной точки, мм												Величина усилия разрушения, даН		
				1				2				3				1	2	3
				С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	выплеск	F	F	F
6,6	4,51	500	63/43	4,44				4,51				4,58				448	495	558
6,7	4,75	540	64/44	4,85				4,70				4,72				490	520	610
6,8	4,94	611	65/45	4,98				4,97				4,88				575	612	647
7,1	5,34	652	67/47	5,44				5,38				5,20				617	662	677
7,4	5,75	730	69/49	5,97				5,60				5,69				646	771	774
7,7	5,83	776	71/51	6,13				5,74				5,61				741	757	829
7,9	5,85	728	73/53	5,88				5,73				5,93				722	729	732
8,2	6,09	678	75/55	6,18				6,05				6,04				651	687	695
8,3	5,57	472	76/56	5,31				5,66				5,75				406	419	591
8,4	6,04	650	77/57	5,98			x	6,04				6,09				637	663	651
8,6	5,85	467	78/58	5,99			x	5,69			x	5,87			x	394	498	509

Примечание: F_{min}= 422 даН – минимально допустимое усилие отрыва;

D_{min} = 4,66 мм – минимально допустимый диаметр сварной точки

Таблица 3.2 – Результаты механических испытаний на срез сварных образцов из двухфазной горячеоцинкованной стали DP600+Z140 с применением термообрабатывающего импульса

Среднее значение величины сварочного тока, кА	Среднее значение диаметра сварной точки, мм	Среднее значение величины усилия разрушения, даН	Значение величины сварочного тока, %	Средний диаметр литого ядра сварной точки, мм												Величина усилия разрушения, даН			
				1				2				3				1	2	3	
				С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	Выплеск	С полным вырывом литого ядра	Без вырыва литого ядра	С частичным вырывом литого ядра	выплеск	F	F	F	
6,6	4,33	1021	63/43	4,25				4,25					4,48				1003	1016	1044
6,7	4,68	1169	64/44	4,69				4,68					4,68				1147	1201	1158
6,8	4,81	1268	65/45	4,75				4,85					4,85				1237	1273	1294
7,1	5,37	1419	67/47	5,39				5,39					5,34				1410	1423	1425
7,4	5,60	1495	69/49	5,60				5,58					5,62				1493	1496	1497
7,7	5,50	1534	71/51	5,15				5,66					5,69				1531	1535	1536
7,9	5,78	1562	73/53	6,02				5,65					5,68				1559	1563	1564
8,2	5,66	1568	75/55	5,79			x	5,39					5,80				1561	1570	1573
8,4	5,61	1383	76/56	5,41			x	5,86			x		5,56				1375	1376	1399
8,5	5,91	1307	77/57	5,74			x	5,82			x		6,16		x		1236	1317	1369
8,7	5,75	1388	78/58	5,58			x	5,72			x		5,95		x		1376	1386	1403

Примечание: F_{min}= 932 даН – минимально допустимое усилие отрыва;
D_{min} = 4,66 мм – минимально допустимый диаметр сварной точки

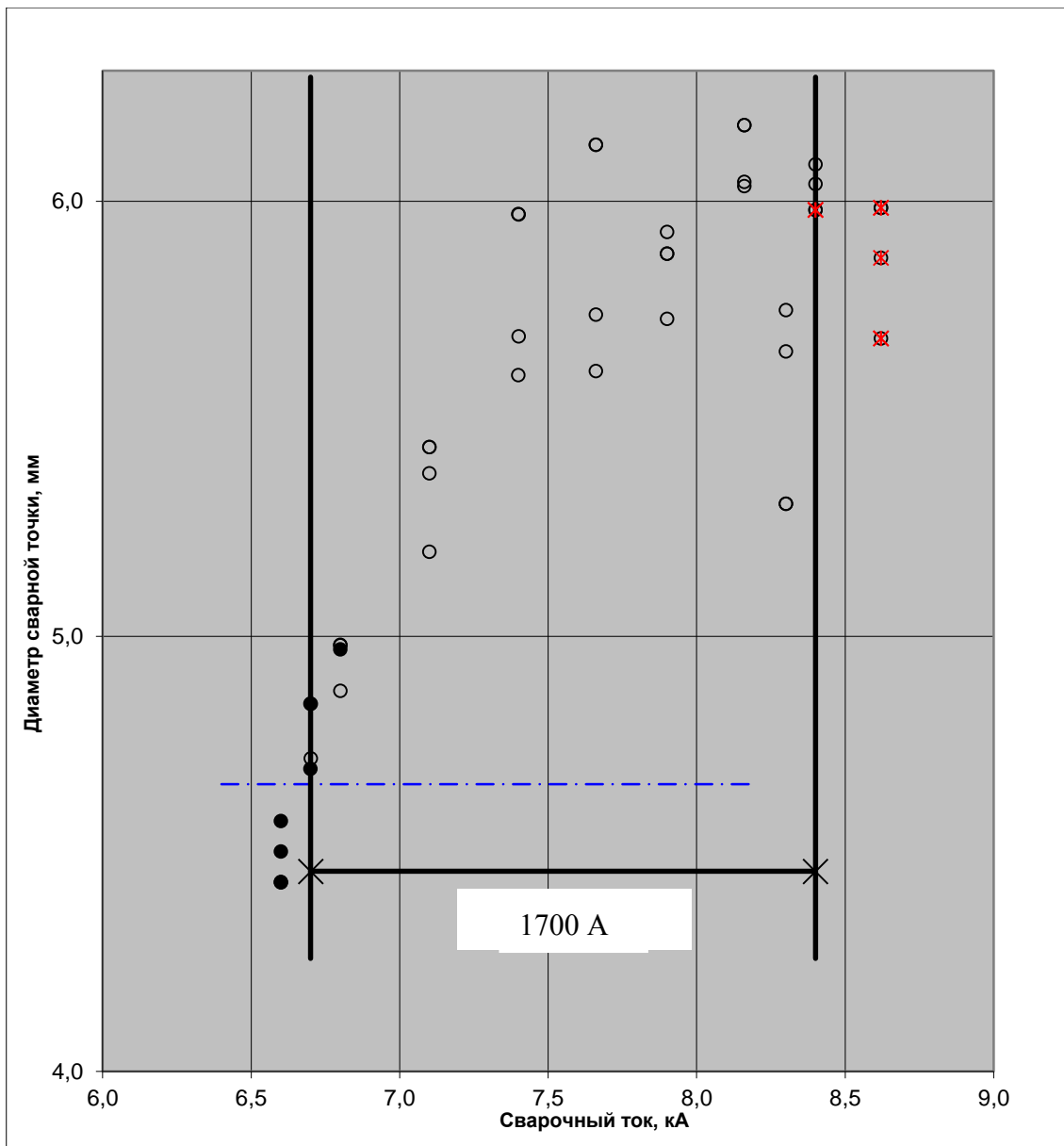


Рисунок 3.4 - Диапазон свариваемости с применением термообрабатывающего импульса горячеоцинкованного проката марки DP600+Z140 толщиной 1,2 мм

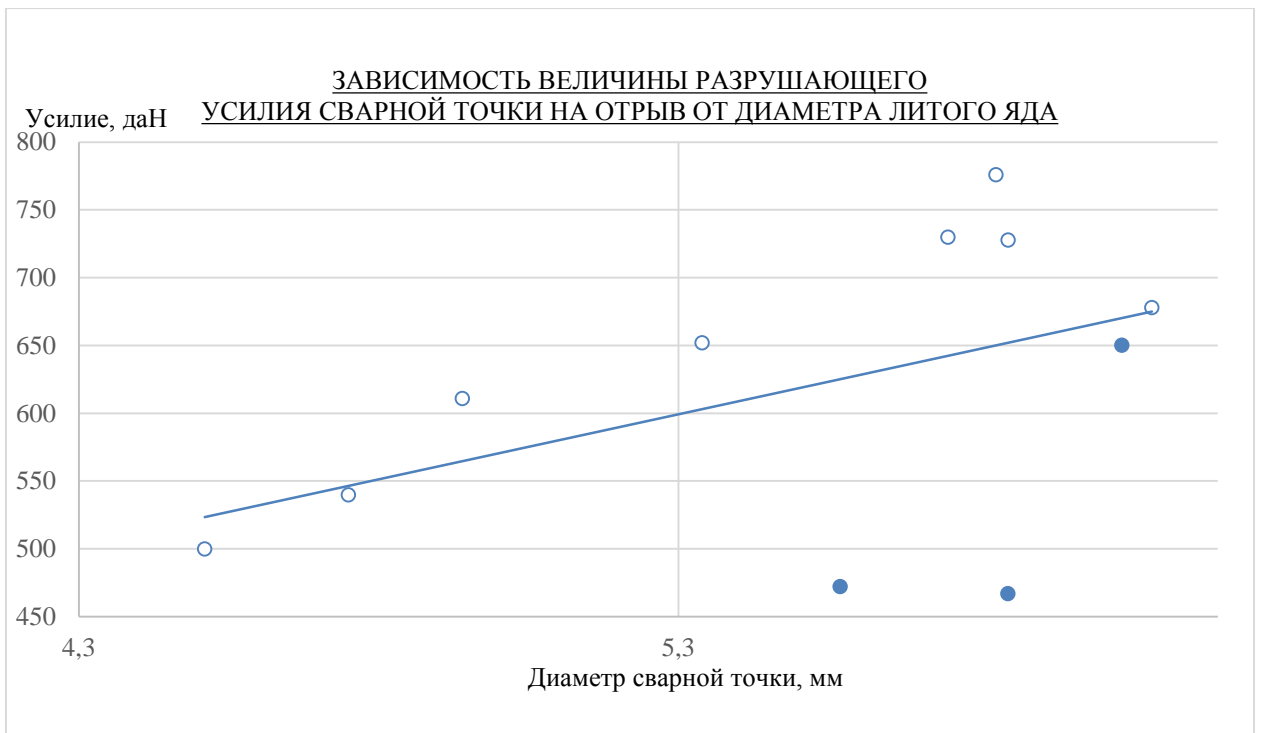


Рисунок 3.5- Зависимость величины усилия отрыва от диаметра ядра сварной точки

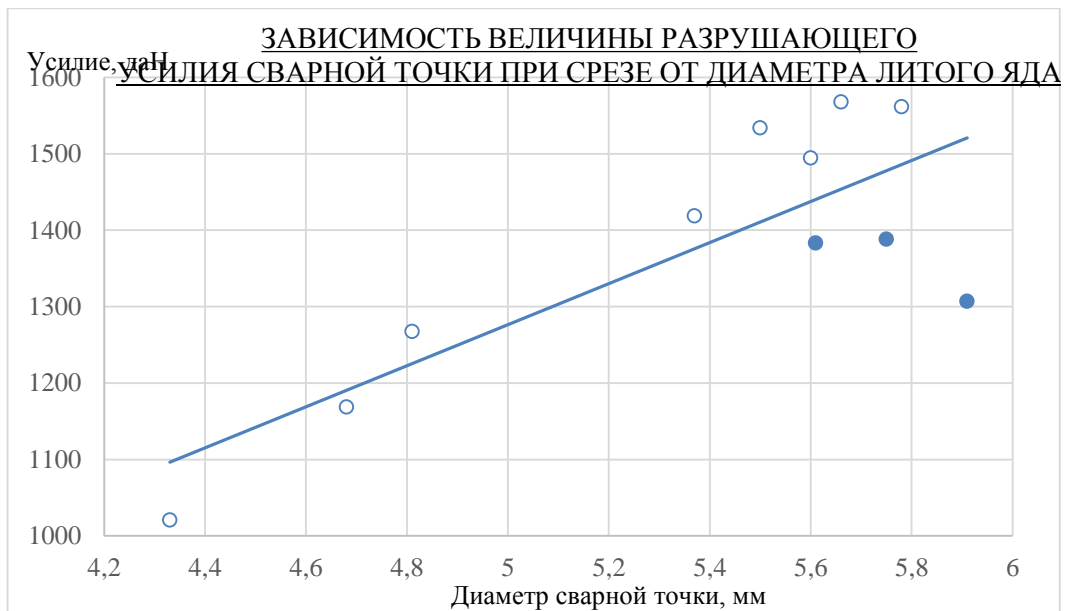


Рисунок 3.6 - Зависимость величины усилия среза от диаметра ядра сварной точки

В ходе проведения эксперимента по подбору параметров контактной точечной сварки листового горячеоцинкованного проката марки DP600+Z140 толщиной 1,2 мм проведены механические испытания сварных образцов, а также замер геометрических параметров литых ядер результаты которых изложены в таблице 3.3. Для удобства дальнейшей работы величины разрушающих усилий усреднены.

Таблица 3.3 – Результаты механических испытаний на срез и отрыв сварных образцов

Номер образца	Среднее значение величины разрушающего усилия при отрыве, Н	Среднее значение величины разрушающего усилия на срез, Н	Среднее значение диаметра литого ядра образцов на отрыв, мм	Среднее значение диаметра литого ядра образцов на срез, мм
1.1-1.5	7647	15830	5,69	5,75
2.1-2.5	5969	16296	5,85	5,61
3.1-3.5	6612	15691	5,37	5,32
4.1-4.5	7583	15355	5,31	5,13
5.1-5.5	7076	15166	5,25	4,94
6.1-6.5	6716	14941	5,28	6,25
7.1-7.5	6346	14178	5,87	6,21
8.1-8.5	7475,6	15627,8	6,13	-
9.1-9.5	7063	15589,2	5,92	-
10.1-10.5	7256	15644	5,93	-
11.1-11.5	6934	15444,8	5,93	-
12.1-12.5	7388	15475,8	5,98	-

Примечание: для образцов 8.1-12.5 средние значения диаметра литого ядра образцов на срез взяты из металлографических исследований. Замеры среднего значения диаметра литого ядра образцов на срез не производились.

3.2 Металлографические исследования и замер твердости

Также с целью оценки наличия дефектов в литом ядре, замере твердости основного материала, ЗТВ, литого ядра и переходных зон произведены металлографические исследования, которые отражены в таблицах 3.4-3. и на рисунках 3.7 – 3.126.

На исследования поступили образцы соединений точечной контактной сварки (ТКС) горячеоцинкованного проката из ферритомартенситной марки DP600 толщиной 1,2 мм (далее – образцы №№ 1.1 – 7.1).

На каждом образце находятся по четыре точки сварки, для исследования были выбраны первые три (по согласованию с заказчиком) с маркировкой 1.1.1, 1.1.2 и т.д.

Для визуальной фиксации представлен внешний вид сварных соединений №№ 1.1 – 7.1 представлен на рисунках 3.7 - 3.13.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 1.1.1, 1.1.2 и 1.1.3 показаны на рисунках 3.14 - 3.16. Проверенные параметры сварных точек образца № 1.1 приведены в таблице 3.4. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 1.1 показаны на рисунках 3.17 – 3.20. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 1.1.1, 1.1.2 и 1.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.4 и на рисунках 3.21 – 3.23. Результаты замеров микротвёрдости точки № 1.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.4, схема замеров указана на рисунке 3.24.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 2.1.1, 2.1.2 и 2.1.3 и показаны на рисунках 3.25 – 3.27. Проверенные параметры сварных точек образца № 2.1 приведены в таблице 3.5. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 2.1 показаны на рисунках 3.28 - 3.29. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 2.1.1, 2.1.2 и 2.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.5 и на рисунках 3.30 – 3.32. Результаты замеров микротвёрдости точки № 2.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.5, схема замеров указана на рисунке 3.33.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 3.1.1, 3.1.2 и 3.1.3 показаны на рисунках 3.34 - 3.36.

Проверенные параметры сварных точек образца № 3.1 приведены в таблице 3.6. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 3.1 показаны на рисунках 3.37 -3.38. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 3.1.1, 3.1.2 и 3.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.6 и на рисунках 3.39 - 3.41. Результаты замеров микротвёрдости точки № 3.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.6, схема замеров указана на рисунке 3.42.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 4.1.1, 4.1.2 и 4.1.3 показаны на рисунках 3.43 – 3.45. Проверенные параметры сварных точек образца № 4.1 приведены в таблице 3.7. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 4.1 показаны на рисунках 3.46 – 3.47. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 4.1.1, 4.1.2 и 4.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.7 и на рисунках 3.48 – 3.50. Результаты замеров микротвёрдости точки № 4.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.7, схема замеров указана на рисунке 3.51.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 5.1.1, 5.1.2 и 5.1.3 показаны на рисунках 3.52 – 3.54. Проверенные параметры сварных точек образца № 5.1 приведены в таблице 3.8. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 5.1 показаны на рисунках 3.55 - 3.56. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 5.1.1, 5.1.2 и 5.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.8 и на рисунках 3.57 - 3.59. Результаты замеров микротвёрдости точки № 5.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.8, схема замеров указана на рисунке 3.60.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 6.1.1, 6.1.2 и 6.1.3 приведены на рисунках 3.61 – 3.63.

Проверенные параметры сварных точек образца № 6.1 приведены в таблице 3.9. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 6.1 показаны на рисунках 3.64 - 3.66. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 6.1.1, 6.1.2 и 6.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.9 и на рисунках 3.67 – 3.69. Результаты замеров микротвёрдости точки № 6.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.9, схема замеров указана на рисунке 3.70.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 7.1.1, 7.1.2 и 7.1.3 показаны на рисунках 3.71 – 3.73. Проверенные параметры сварных точек образца № 7.1 приведены в таблице 3.10. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 7.1 показаны на рисунках 3.74 - 7.6. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 7.1.1, 7.1.2 и 7.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.10 и на рисунках 3.74-3.76. Результаты замеров микротвёрдости точки № 7.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.10, схема замеров указана на рисунке 3.77.

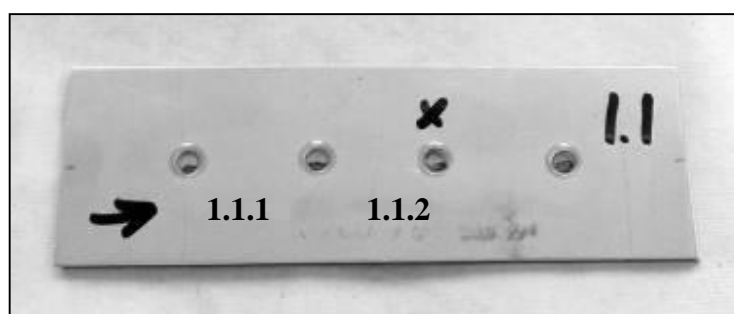


Рисунок 3.7 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 1.1

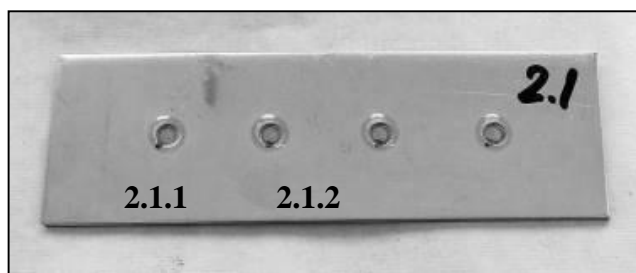


Рисунок 3.8 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 2.1

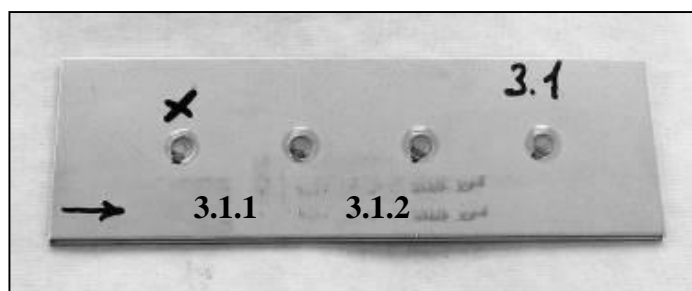


Рисунок 3.9 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 3.1

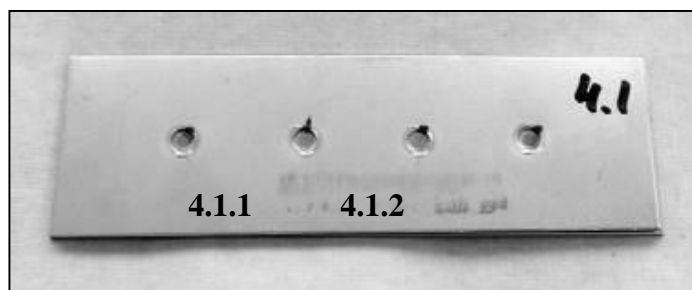


Рисунок 3.10 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 4.1

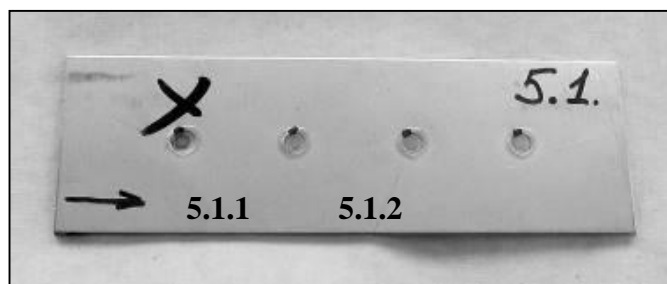


Рисунок 3.11 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 5.1

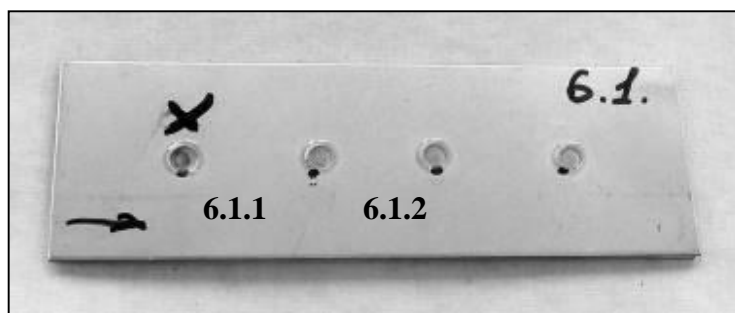


Рисунок 3.12 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 6.1

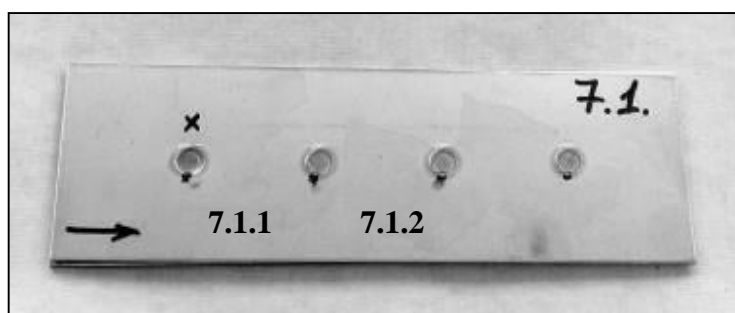


Рисунок 3.13 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 7.1

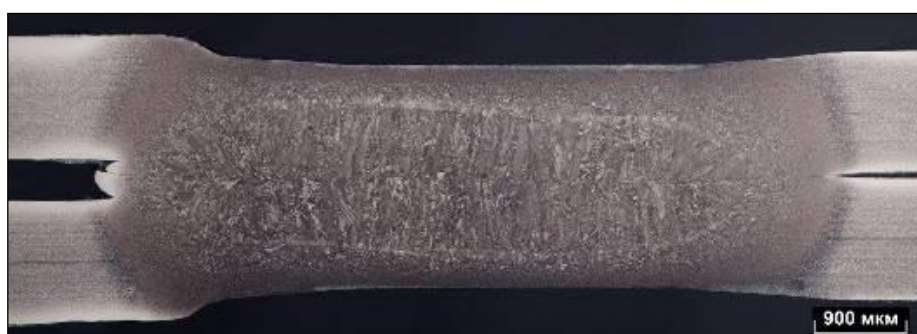


Рисунок 3.14 – Макроструктура сварной точки 1.1.1



Рисунок 3.15 – Макроструктура сварной точки 1.1.2



Рисунок 3.16– Макроструктура сварной точки 1.1.3

Таблица 3.4 – Проверенные параметры сварных точек образца № 1.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 1.1.1: 5,62 мм × 1,51 мм Точка 1.1.2: 6,05 мм × 1,60 мм Точка 1.1.3: 4,44 мм × 1,34 мм
Глубина вмятины	Точка 1.1.1: $g \approx 0,22$ мм; $g_1 \approx 0,23$ мм Точка 1.1.2: $g \approx 0,22$ мм; $g_1 \approx 0,24$ мм Точка 1.1.3: $g \approx 0,37$ мм; $g_1 \approx 0,40$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 1.1.1: Дефект длиной 0,69 мм, рисунок 3.17. Точка 1.1.2: Дефект в литом ядре размером 0,035 мм × 0,026 мм, рисунок 3.18. Дефект с поверхности в ЗТВ размером 0,11 мм × 0,043 мм, рисунок 3.19. Точка 1.1.3: Раковины тах размером 0,85 мм × 0,11 мм, рисунок 3.20. Дефекты в литом ядре тах размером 0,07 мм × 0,04 мм, рисунок 3.20.
Микроструктура	Точки 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.21. ЗТВ - мартенсит, феррит, рисунок 3.22. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.23.
Твердость точки 1.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 1.1.1, рисунок 3.24. Основной металл: т.1 - 185; т.2 - 185; т.3 – 192 ЗТВ 1: т.1 - 293 ; т.2 - 286; т.3 – 269 ЗТВ 2: т.1 - 399; т.2 - 395; т.3 - 390 ЗТВ 3: т.1 - 383; т.2 - 387; т.3 - 382 Литое ядро: т.1 - 356; т.2 - 365; т.3 – 368; т.4 - 353; т.5 - 362; т.6 - 368
1) - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	

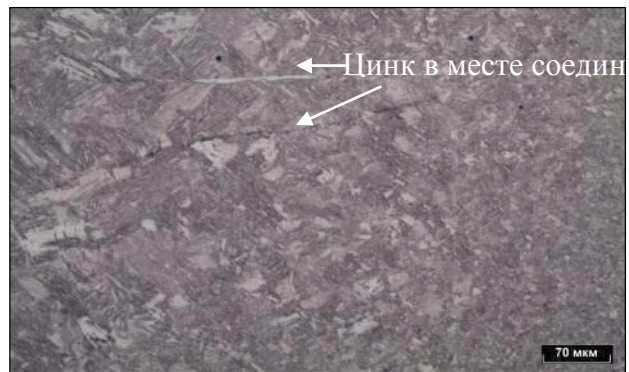


Рисунок 3.17 – Дефект в сварной точке 1.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.18 – Дефект в литом ядре в сварной точке 1.1.2,
не травлено

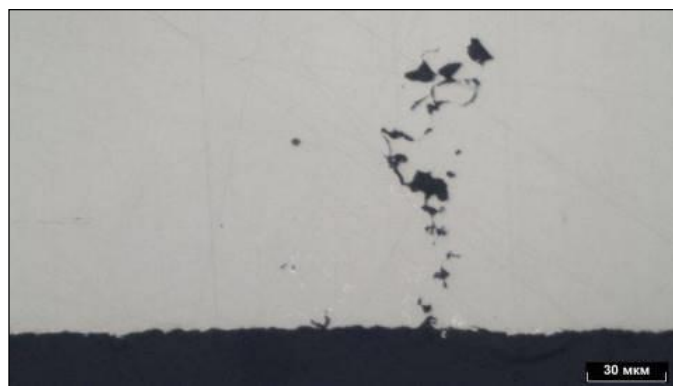


Рисунок 3.19 – Дефект с поверхности в ЗТВ в сварной точке 1.1.2,
не травлено



Рисунок 3.20 – Дефекты в литом ядре в сварной точке 1.1.3,
не травлено



Рисунок 3.21– Микроструктура проката вне зон сварки, точка 1.1.1,
травитель – нитал

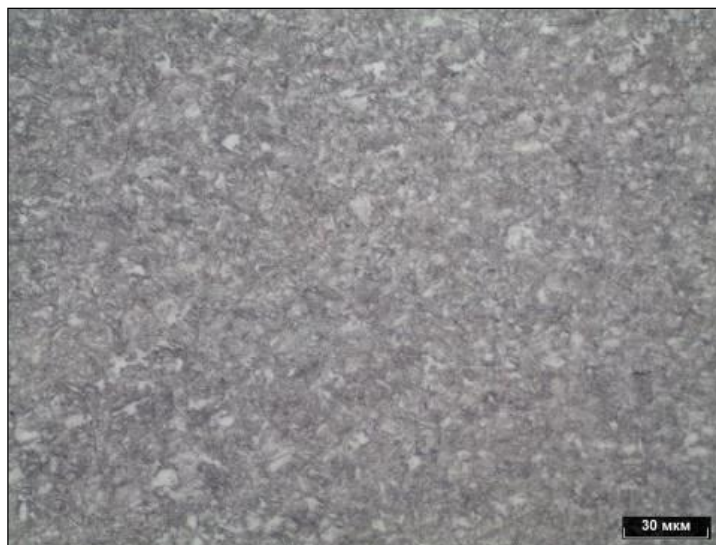


Рисунок 3.22 –Микроструктура ЗТВ точки 1.1.1,

травитель – нитал

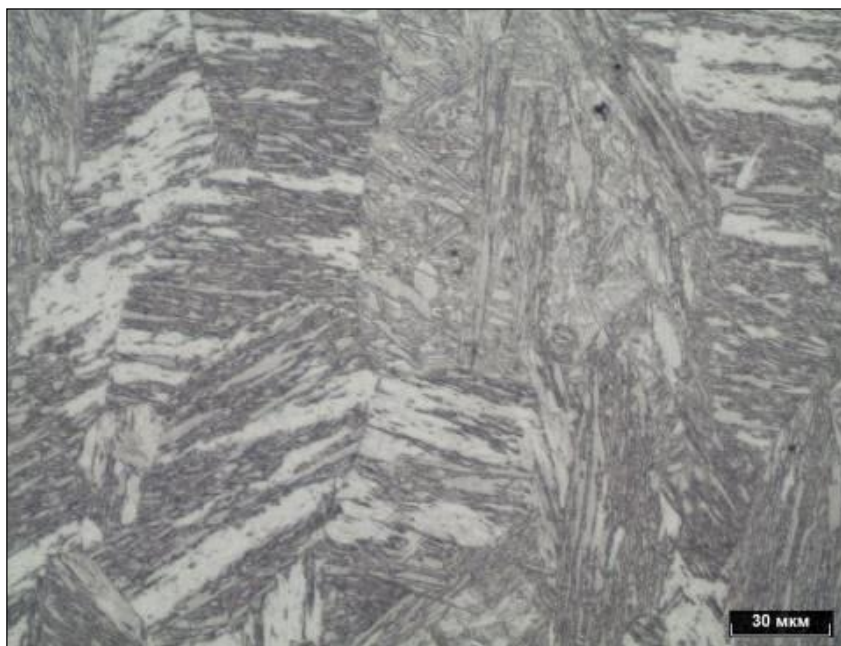


Рисунок 3.23 – Микроструктура зоны литого ядра точки 1.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.24 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 1.1.1



Рисунок 3.25 – Макроструктура сварной точки 2.1.1



Рисунок 3.26 – Макроструктура сварной точки 2.1.2



Рисунок 3.27 – Макроструктура сварной точки 2.1.3

Таблица 3.5 – Проверенные параметры сварных точек образца № 2.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 2.1.1: 6,34 мм × 1,29 мм Точка 2.1.2: 5,97 мм × 1,30 мм Точка 2.1.3: 5,60 мм × 1,30 мм
Глубина вмятины	Точка 2.1.1: $g \approx 0,35$ мм; $g_1 \approx 0,41$ мм Точка 2.1.2: $g \approx 0,37$ мм; $g_1 \approx 0,36$ мм Точка 2.1.3: $g \approx 0,39$ мм; $g_1 \approx 0,40$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 2.1.1: Дефект в литом ядре размером 0,050 мм × 0,047 мм, рисунок 3.28. Точка 2.1.2: Дефект в литом ядре длиной $\approx 1,47$ мм, рисунок 3.29. Точка 2.1.3: Дефекты не выявлены
Микроструктура	Точки 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.30. ЗТВ - мартенсит, феррит, рисунок 3.31. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.32.
Твердость точки 2.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 2.1.1, рисунок 3.33. Основной металл: т.1 - 198; т.2 - 201; т.3 – 206 ЗТВ 1: т.1 - 265 ; т.2 - 263; т.3 – 297 ЗТВ 2: т.1 - 362; т.2 - 372; т.3 - 368 ЗТВ 3: т.1 - 384; т.2 - 378; т.3 - 377 Литое ядро: т.1 - 349; т.2 - 353; т.3 – 365; т.4 - 400; т.5 - 372; т.6 - 365
¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.28 – Дефект в литом ядре в сварной точке 2.1.1, не травлено



Рисунок 3.29 – Дефект в сварной точке 2.1.2,
не травлено

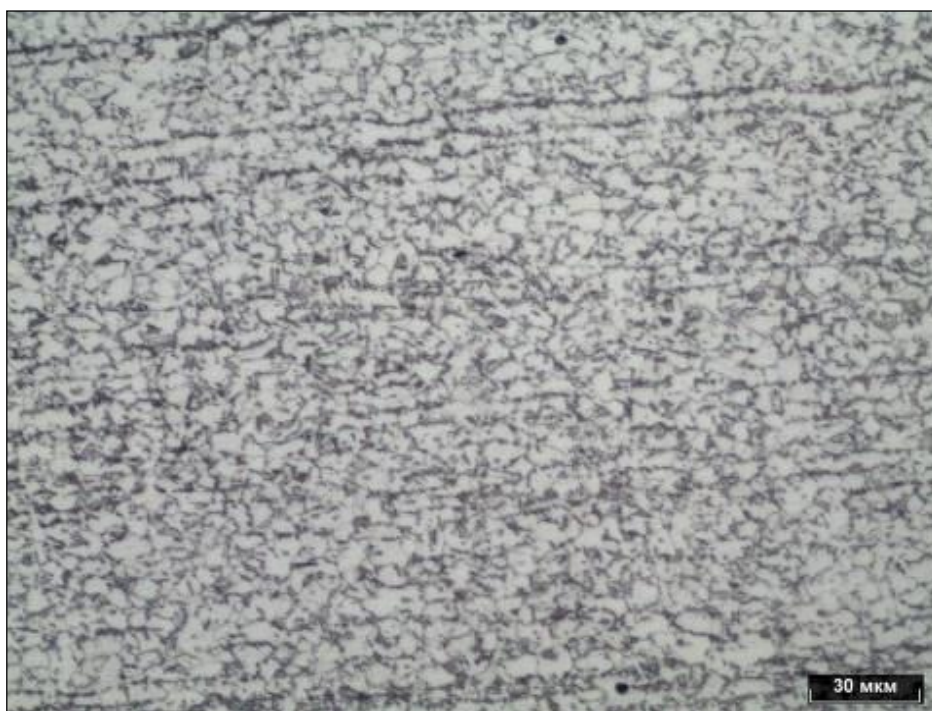


Рисунок 3.30 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 2.1.1,
травитель – нитал

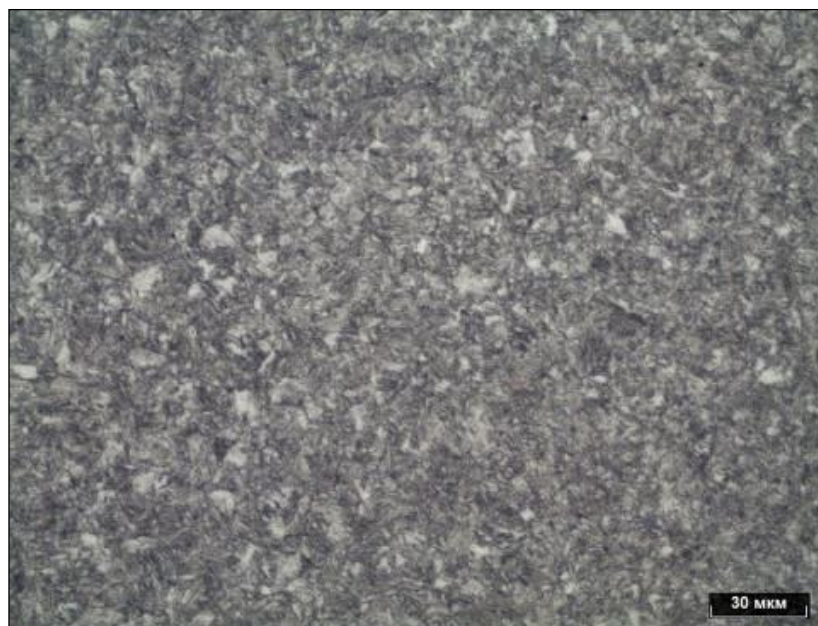


Рисунок 3.31 – Микроструктура ЗТВ точки 2.1.1,
травитель – нитал

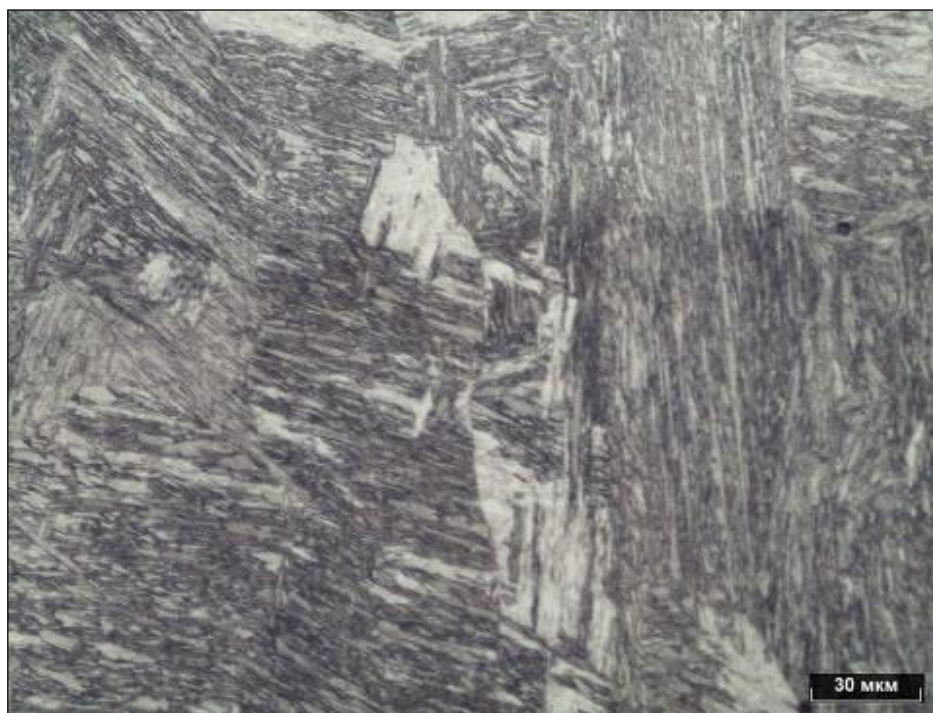


Рисунок 3.32 – Микроструктура зоны литого ядра точки 2.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.33 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 2.1.1



Рисунок 3.34 – Макроструктура сварной точки 3.1.1



Рисунок 3.35 – Макроструктура сварной точки 3.1.2



Рисунок 3.36 – Макроструктура сварной точки 3.1.3

Таблица 3.6 – Проверенные параметры сварных точек образца № 3.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) <u>Точка 3.1.1:</u> 5,05 мм × 1,27 мм <u>Точка 3.1.2:</u> 5,30 мм × 1,62 мм <u>Точка 3.1.3:</u> 5,92 мм × 1,62 мм
Глубина вмятины	<u>Точка 3.1.1:</u> g ≈ 0,30 мм; g ₁ ≈ 0,30 мм <u>Точка 3.1.2:</u> g ≈ 0,26 мм; g ₁ ≈ 0,22 мм <u>Точка 3.1.3:</u> g ≈ 0,25 мм; g ₁ ≈ 0,26 мм
Дефекты точек сварки	<u>Точка 3.1.1:</u> Дефект в литом ядре размером 0,02 мм × 0,02 мм, рисунок 3.37. <u>Точка 3.1.2:</u> Дефекты не выявлены <u>Точка 3.1.3:</u> Дефект в литом ядре размером 0,028 мм × 0,025 мм, рисунок 3.38.
Микроструктура	<u>Точки 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 (основные составляющие микроструктуры):</u> Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.39. ЗТВ - мартенсит, феррит, рисунок 3.40. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.41.
Твердость точки 3.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 3.1.1, рисунок 3.42. Основной металл: т.1 - 196; т.2 - 194; т.3 – 205 ЗТВ 1: т.1 - 267 ; т.2 - 258; т.3 – 251 ЗТВ 2: т.1 - 334; т.2 - 360; т.3 - 373 ЗТВ 3: т.1 - 384; т.2 - 384; т.3 - 393 Литое ядро: т.1 - 363; т.2 - 363; т.3 – 362; т.4 - 378; т.5 - 376; т.6 - 371
¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.37 – Дефект в литом ядре в сварной точке 3.1.1,
не травлено

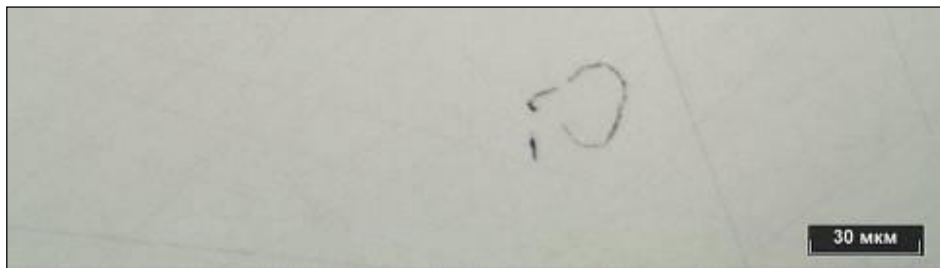


Рисунок 3.38 – Дефект в литом ядре в сварной точке 3.1.3,
не травлено

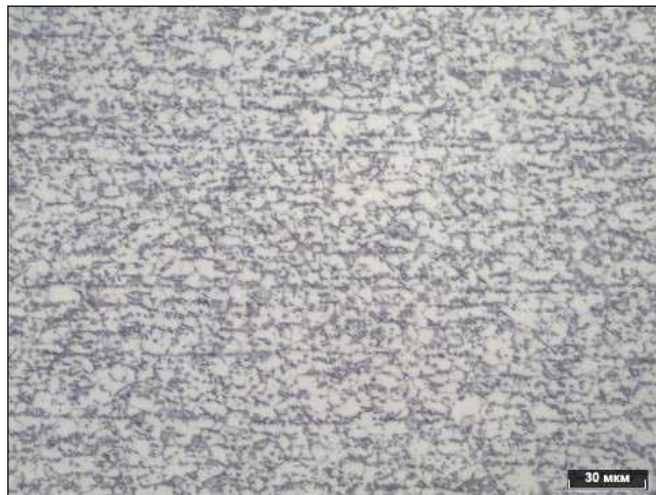


Рисунок 3.39 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 3.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.40 – Микроструктура ЗТВ точки 3.1.1,
травитель – нитал

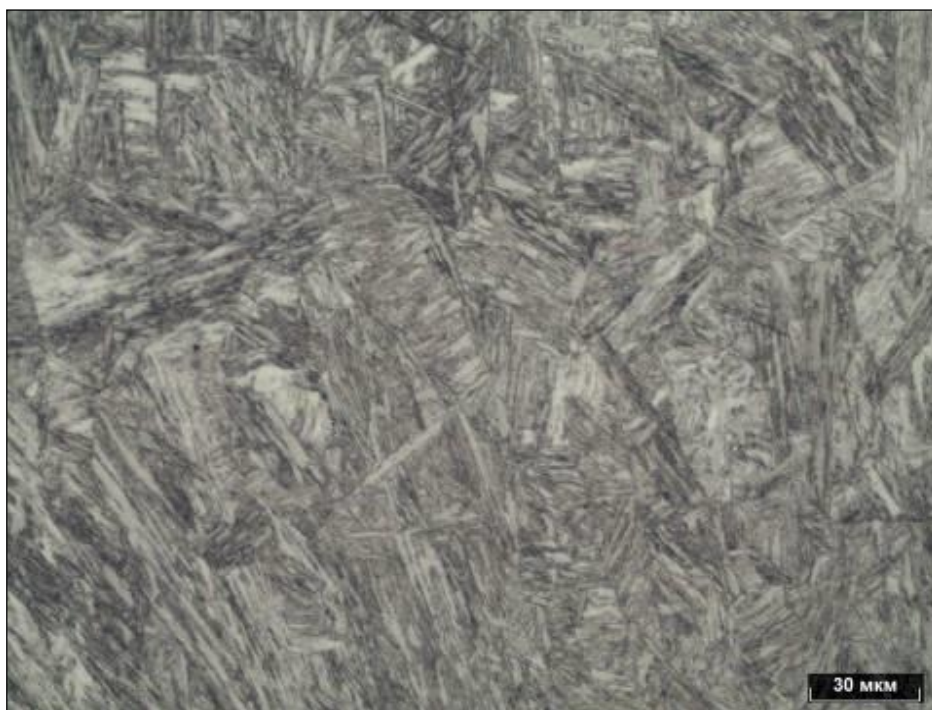


Рисунок 3.41 – Микроструктура зоны литого ядра точки 3.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.42 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 3.1.1

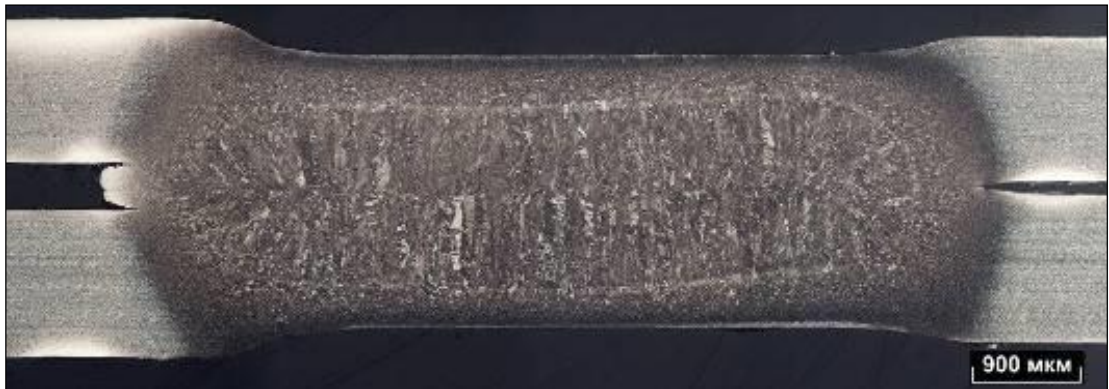


Рисунок 3.43 – Макроструктура сварной точки 4.1.1



Рисунок 3.44 – Макроструктура сварной точки 4.1.2

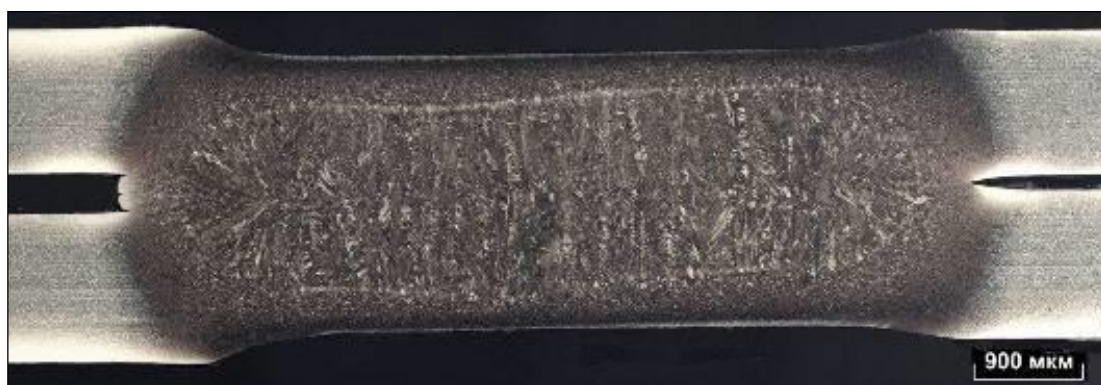


Рисунок 3.45 – Макроструктура сварной точки 4.1.3

Таблица 3.7 – Проверенные параметры сварных точек образца № 4.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 4.1.1: 5,93 мм × 1,51 мм Точка 4.1.2: 6,18 мм × 1,61 мм Точка 4.1.3: 6,05 мм × 1,63 мм
Глубина вмятины	Точка 4.1.1: $g \approx 0,20$ мм; $g_1 \approx 0,18$ мм Точка 4.1.2: $g \approx 0,20$ мм; $g_1 \approx 0,20$ мм Точка 4.1.3: $g \approx 0,20$ мм; $g_1 \approx 0,18$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 4.1.1: Дефект в литом ядре размером 0,059 мм × 0,068 мм, рисунок 3.46. Точка 4.1.2: Дефекты не выявлены Точка 4.1.3: Дефект в литом ядре размером 0,05 мм × 0,04 мм, рисунок 3.47.
Микроструктура	Точки 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.48. ЗТВ - мартенсит, феррит, рисунок 3.49. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.50.
Твердость точки 4.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 4.1.1, рисунок 3.51. Основной металл: т.1 - 194; т.2 - 200; т.3 - 199 ЗТВ 1: т.1 - 293; т.2 - 340; т.3 - 324 ЗТВ 2: т.1 - 331; т.2 - 364; т.3 - 385 ЗТВ 3: т.1 - 386; т.2 - 382; т.3 - 361 Литое ядро: т.1 - 361; т.2 - 356; т.3 - 363; т.4 - 347; т.5 - 377; т.6 - 372
¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.46 – Дефект в литом ядре в сварной точке 4.1.1,
не травлено



Рисунок 3.47 – Дефект в литом ядре в сварной точке 4.1.3,
не травлено



Рисунок 3.48 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 4.1.1,
травитель – нитал

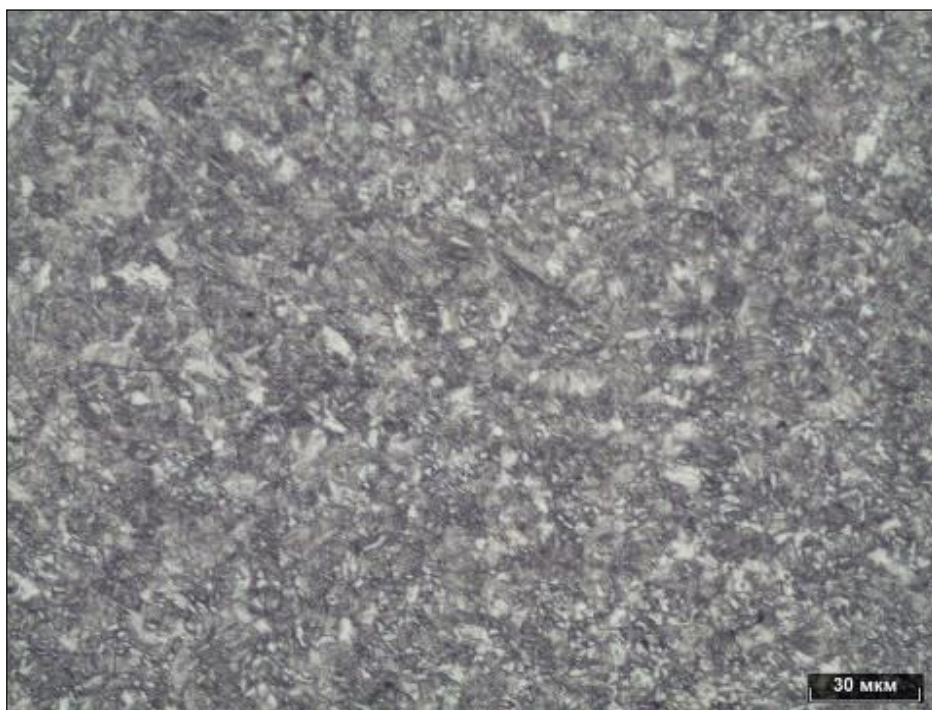


Рисунок 3.49 – Микроструктура ЗТВ точки 4.1.1,
травитель – нитал

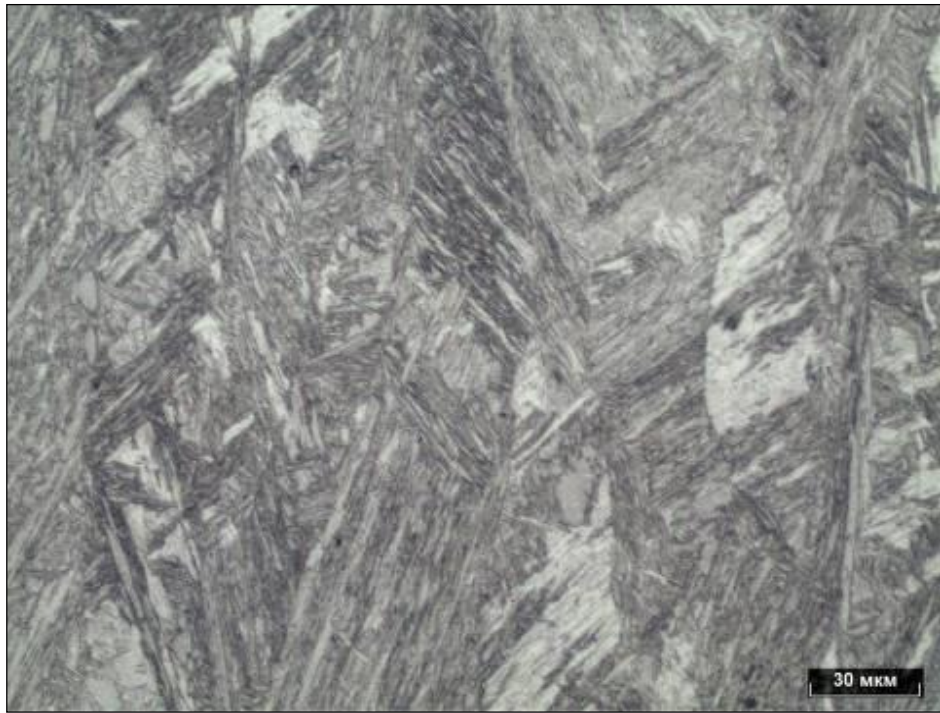


Рисунок 3.50 – Микроструктура зоны литого ядра точки 4.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.51 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 4.1.1



Рисунок 3.52 – Макроструктура сварной точки 5.1.1



Рисунок 3.53 – Макроструктура сварной точки 5.1.2



Рисунок 3.54 – Макроструктура сварной точки 5.1.3

Таблица 3.8 – Проверенные параметры сварных точек образца № 5.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 5.1.1: 4,86 мм × 1,10 мм Точка 5.1.2: 5,54 мм × 1,59 мм Точка 5.1.3: 6,0 мм × 1,78 мм
Глубина вмятины	Точка 5.1.1: $g \approx 0,40$ мм; $g_1 \approx 0,39$ мм Точка 5.1.2: $g \approx 0,14$ мм; $g_1 \approx 0,15$ мм Точка 5.1.3: $g \approx 0,16$ мм; $g_1 \approx 0,18$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 5.1.1: Дефект типа «плена», аналогичный дефекту в точке 1.1.1, длиной 1,22 мм. Точка 5.1.2: Дефект в литом ядре размером 0,12 мм × 0,06 мм, рисунок 3.55. Несплавление по всему диаметру литого ядра. Точка 5.1.3: Дефект в литом ядре размером 0,11 мм × 0,06 мм, рисунок 3.56.
Микроструктура	Точки 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.57. ЗТВ – мартенсит, феррит, рисунок 3.58. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.59.
Твердость точки 5.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 5.1.1, рисунок 3.60. Основной металл: т.1 – 195; т.2 – 198; т.3 – 187 ЗТВ 1: т.1 – 273; т.2 – 290; т.3 – 316 ЗТВ 2: т.1 – 340; т.2 – 348; т.3 – 327 ЗТВ 3: т.1 – 301; т.2 – 302; т.3 – 318 Литое ядро: т.1 – 352; т.2 – 353; т.3 – 380; т.4 – 385; т.5 – 380; т.6 – 398
¹⁾ – замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.55 – Дефект в литом ядре в сварной точке 5.1.1, не травлено



Рисунок 3.56 – Дефект в литом ядре в сварной точке 5.1.3,
не травлено

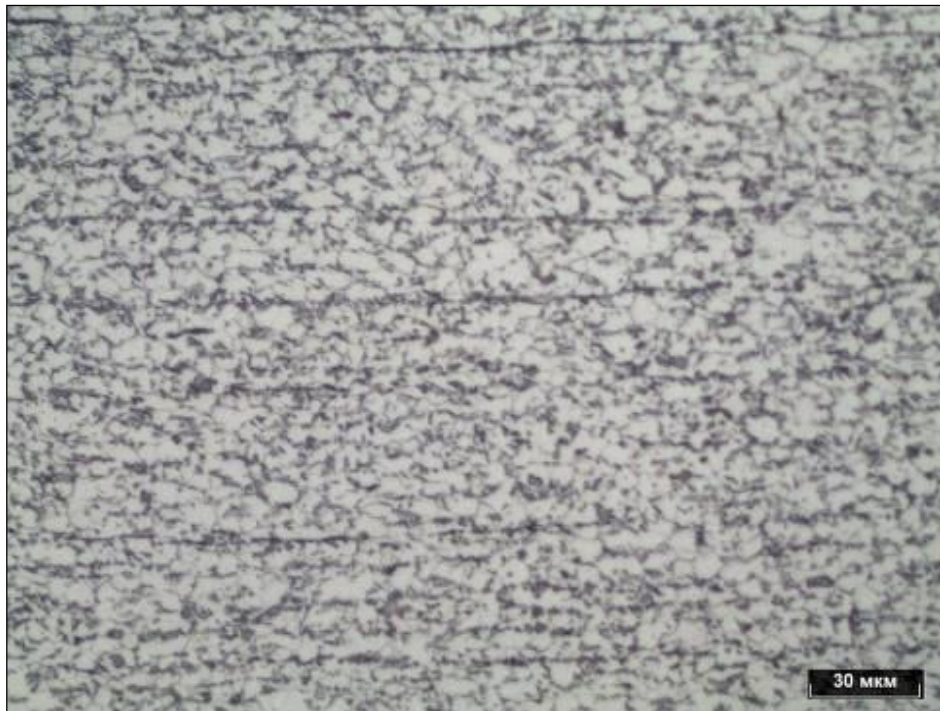


Рисунок 3.57 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 5.1.1,
травитель – нитал

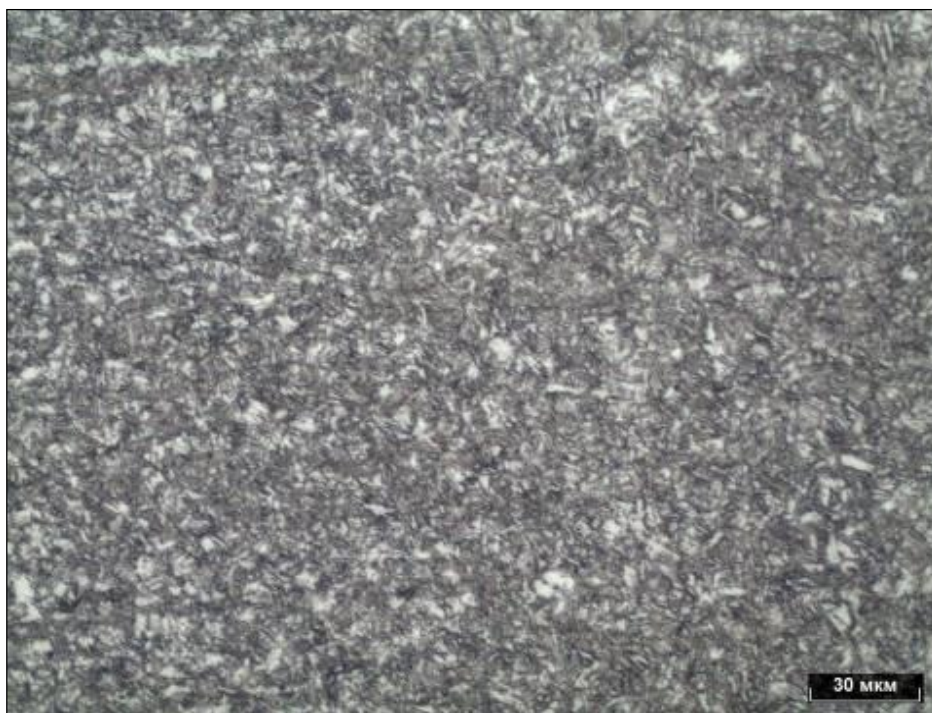


Рисунок 3.58 – Микроструктура ЗТВ точки 5.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.59 – Микроструктура зоны литого ядра точки 5.1.1,
травитель – нитал

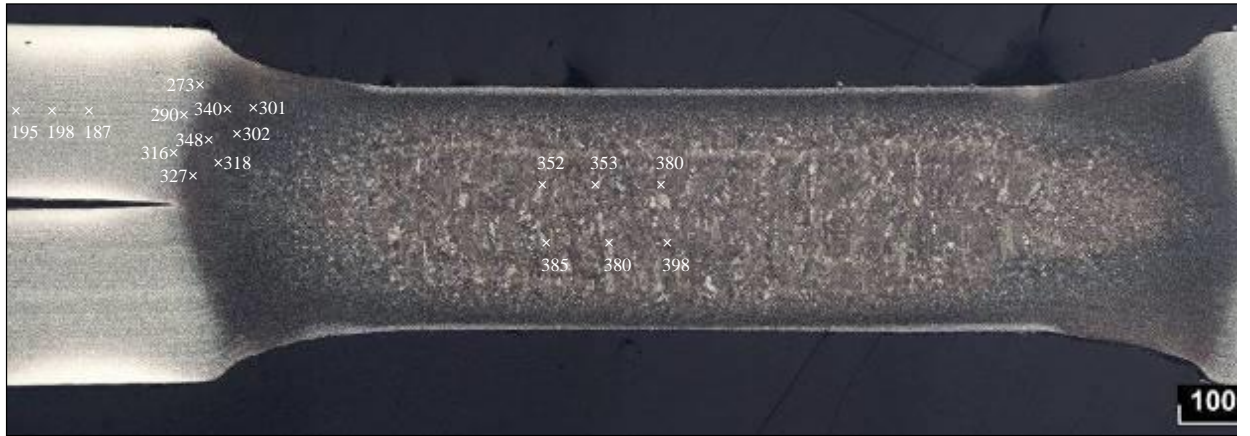


Рисунок 3.60 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 5.1.1



Рисунок 3.61 – Макроструктура сварной точки 6.1.1



Рисунок 3.62 – Макроструктура сварной точки 6.1.2



Рисунок 3.63 – Макроструктура сварной точки 6.1.3

Таблица 3.9 – Проверенные параметры сварных точек образца № 6.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 6.1.1: 5,0 мм × 1,24 мм Точка 6.1.2: 5,7 мм × 1,55 мм Точка 6.1.3: 5,9 мм × 1,56 мм
Глубина вмятины	Точка 6.1.1: $g \approx 0,35$ мм; $g_1 \approx 0,35$ мм Точка 6.1.2: $g \approx 0,15$ мм; $g_1 \approx 0,15$ мм Точка 6.1.3: $g \approx 0,16$ мм; $g_1 \approx 0,17$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 6.1.1: Дефекты в литом ядре тах размером 0,03 мм × 0,03 мм, рисунок 3.65. Точка 6.1.2: Дефекты в литом ядре тах размером 0,09 мм × 0,03 мм, рисунок 3.66. Точка 6.1.3: Дефекты в литом ядре тах размером 0,06 мм × 0,04 мм, рисунок 3.67.
Микроструктура	Точки 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.68. ЗТВ – мартенсит, феррит, рисунок 3.69. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.70.
Твердость точки 6.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 6.1.1, рисунок 3.71. Основной металл: т.1 – 211; т.2 – 214; т.3 – 213 ЗТВ 1: т.1 – 267; т.2 – 269; т.3 – 256 ЗТВ 2: т.1 – 310; т.2 – 307; т.3 – 286 ЗТВ 3: т.1 – 296; т.2 – 334; т.3 – 345 Литое ядро: т.1 – 375; т.2 – 378; т.3 – 381; т.4 – 371; т.5 – 400; т.6 – 398
¹⁾ – замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.64 – Дефект в литом ядре в сварной точке 6.1.1,
не травлено



Рисунок 3.65 – Дефект в литом ядре в сварной точке 6.1.2,
не травлено

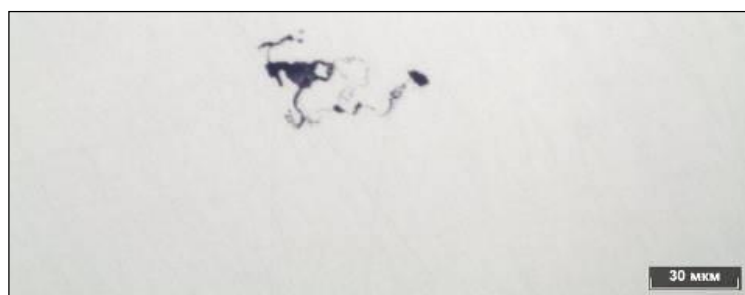


Рисунок 3.66 – Дефект в литом ядре в сварной точке 6.1.3,
не травлено



Рисунок 3.67 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 6.1.1,
травитель – нитал

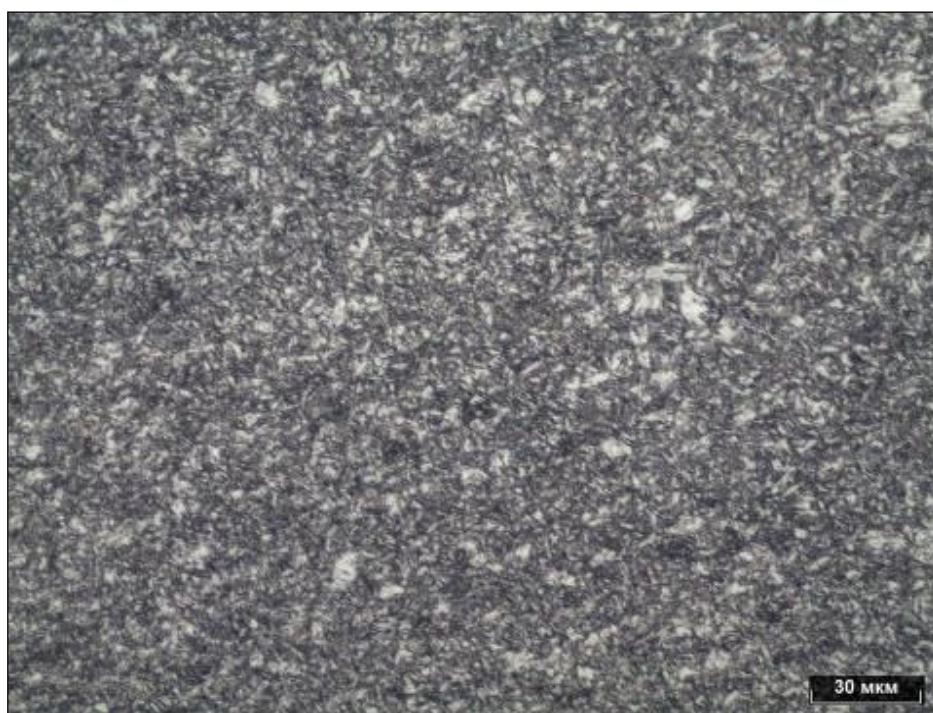


Рисунок 3.68 – Микроструктура ЗТВ точки 6.1.1,
травитель – нитал

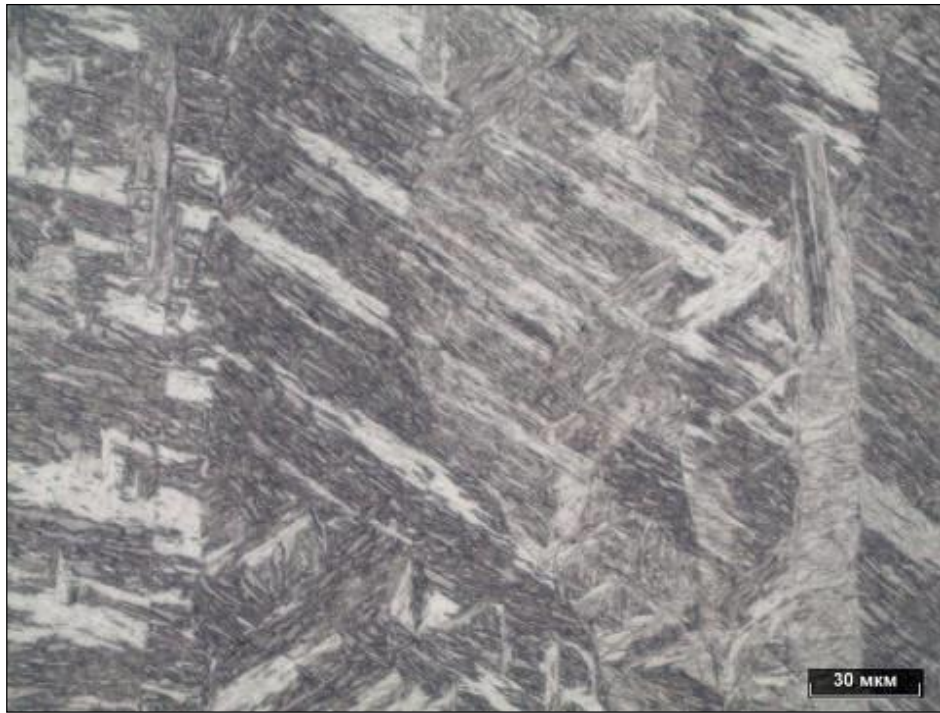


Рисунок 3.70 – Микроструктура зоны литого ядра точки 6.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.71 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 6.1.1



Рисунок 3.72 – Макроструктура сварной точки 7.1.1



Рисунок 3.73 – Макроструктура сварной точки 7.1.2



Рисунок 3.74 – Макроструктура сварной точки 7.1.3

Таблица 3.10 – Проверенные параметры сварных точек образца № 7.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 7.1.1: 4,95 мм × 1,24 мм Точка 7.1.2: 5,82 мм × 1,56 мм Точка 7.1.3: 5,95 мм × 1,53 мм
Глубина вмятины	Точка 7.1.1: $g \approx 0,30$ мм; $g_1 \approx 0,28$ мм Точка 7.1.2: $g \approx 0,13$ мм; $g_1 \approx 0,14$ мм Точка 7.1.3: $g \approx 0,17$ мм; $g_1 \approx 0,16$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 7.1.1: Дефекты в литом ядре тах размером 0,02 мм × 0,02 мм, рисунок 3.75. Точка 7.1.2: Дефекты в литом ядре тах размером 0,08 мм × 0,07 мм, рисунок 3.76. Точка 7.1.3: Дефекты в литом ядре тах размером 0,18 мм × 0,11 мм, рисунок 3.77.
Микроструктура	Точки 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.78. ЗТВ – мартенсит, феррит, рисунок 3.79. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.80.
Твердость точки 7.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 7.1.1, рисунок 3.81. Основной металл: т.1 – 198; т.2 – 194; т.3 – 187 ЗТВ 1: т.1 – 270; т.2 – 268; т.3 – 261 ЗТВ 2: т.1 – 310; т.2 – 331; т.3 – 331 ЗТВ 3: т.1 – 300; т.2 – 303; т.3 – 302 Литое ядро: т.1 – 387; т.2 – 385; т.3 – 378; т.4 – 385; т.5 – 385; т.6 – 387
¹⁾ – замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.75 – Участок дефектов в литом ядре в сварной точке 7.1.1, не травлено

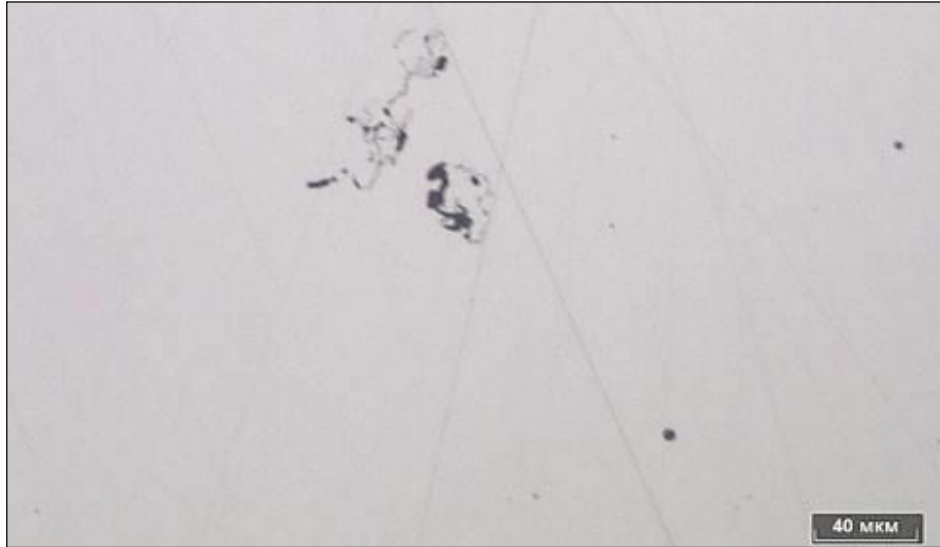


Рисунок 3.76 – Дефект в литом ядре в сварной точке 7.1.2,
не травлено

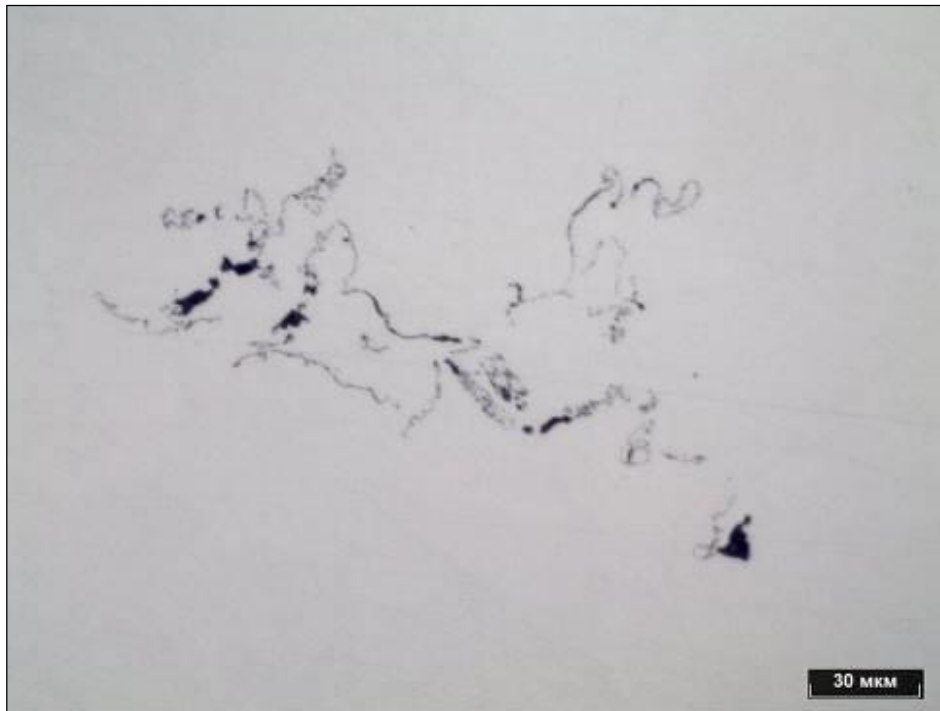


Рисунок 3.77 – Дефект в литом ядре в сварной точке 7.1.3,
не травлено



Рисунок 3.78 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 7.1.1,
травитель – нитал

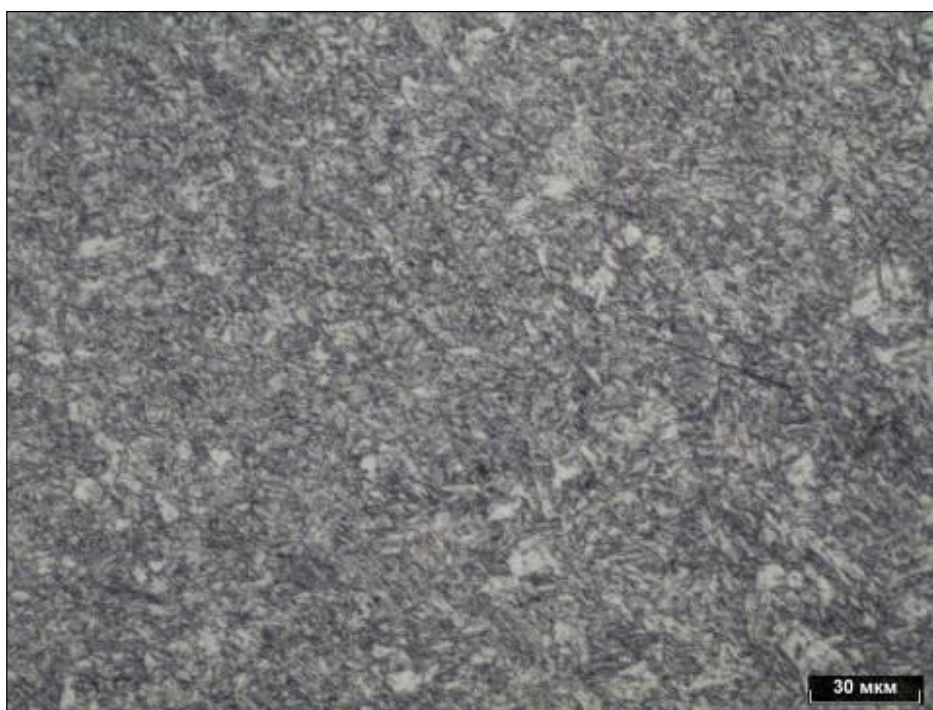


Рисунок 3.79 – Микроструктура ЗТВ точки 7.1.1,
травитель – нитал

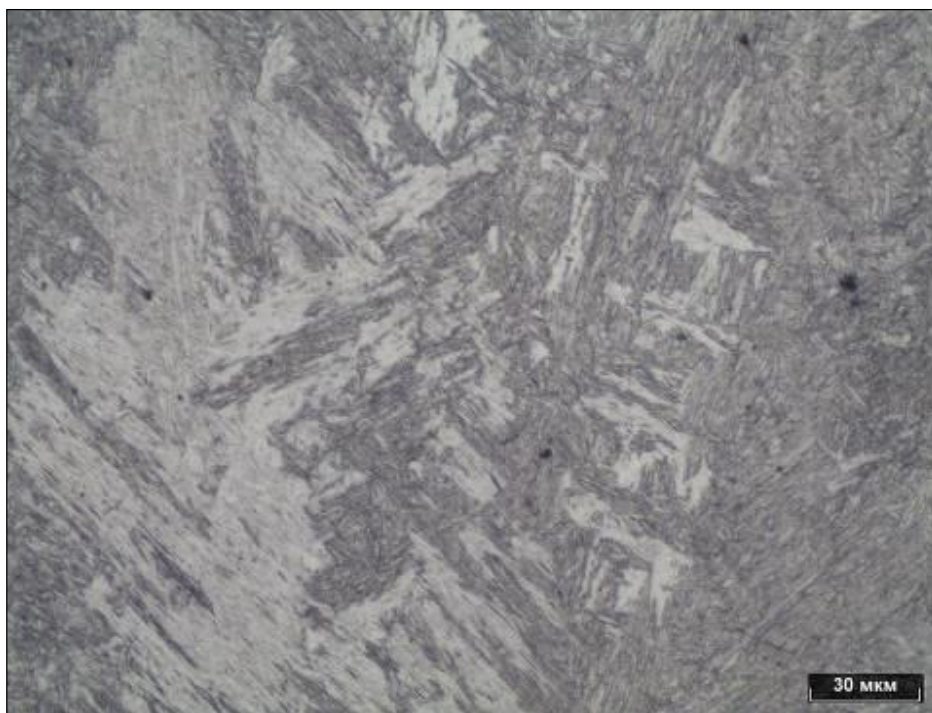


Рисунок 3.80 – Микроструктура зоны литого ядра точки 7.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.81 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 7.1.1

На исследования поступили образцы соединений точечной контактной сварки (ТКС) горячеоцинкованного проката из ферритомартенситной марки DP600 толщиной 1,2 мм (далее – образцы №№ 8.1 – 12.1).

На каждом образце находятся по четыре точки сварки, для исследования были выбраны первые три (по согласованию с заказчиком) с маркировкой 8.1.1, 8.1.2 и т.д.

Внешний вид сварных соединений №№ 8.1 – 12.1 представлен на рисунках 3.82 – 3.86.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 8.1.1, 8.1.2 и 8.1.3 приведены на рисунках 3.87 – 3.89. Проверенные параметры сварных точек образца № 8.1 приведены в таблице 3.11. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 8.1 показаны на рисунках 3.90 – 3.93. Для оценки изменения микроструктуры материала проводились исследования в различных зонах сварных точек №№ 8.1.1, 8.1.2 и 8.1.3, результаты анализа микроструктур приведены в таблице 3.11 и на рисунках 3.94 – 3.96. Результаты замеров микротвёрдости точки № 8.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.11, схема замеров указана на рисунке 3.97.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 9.1.1, 9.1.2 и 9.1.3 показаны на рисунках 3.98 – 3.100. Проверенные параметры сварных точек образца № 9.1 приведены в таблице 3.12. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 9.1 показаны на рисунках 3.101-3.103. Результаты замеров микротвёрдости точки № 9.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.12, схема замеров указана на рисунке 3.104.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 10.1.1, 10.1.2 и 10.1.3 приведены на рисунках 3.105 – 3.107. Проверенные параметры сварных точек образца № 10.1 приведены в таблице 3.13. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 10.1 показаны на рисунках 3.108 – 3.110. Результаты замеров микротвёрдости точки № 10.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.13, схема замеров указана на рисунке 3.111.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 11.1.1, 11.1.2 и 11.1.3 приведены на рисунках 3.112 – 3.114. Проверенные параметры сварных точек образца № 11.1 приведены в таблице 3.14. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 11.1 показаны на рисунках 3.115 – 3.117. Результаты замеров микротвёрдости точки № 11.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.14, схема замеров указана на рисунке 3.118.

Для оценки структурных изменений приведены макроструктуры сварных точек 12.1.1, 12.1.2 и 12.1.3 приведены на рисунках 3.119-3.122. Проверенные параметры сварных точек образца № 12.1 приведены в таблице 3.15. Дефекты исследованных сварных соединений образца № 12.1 показаны на рисунках 3.123 – 3.125. Результаты замеров микротвёрдости точки № 12.1.1 в различных зонах приведены в таблице 3.15, схема замеров указана на рисунке 3.126.

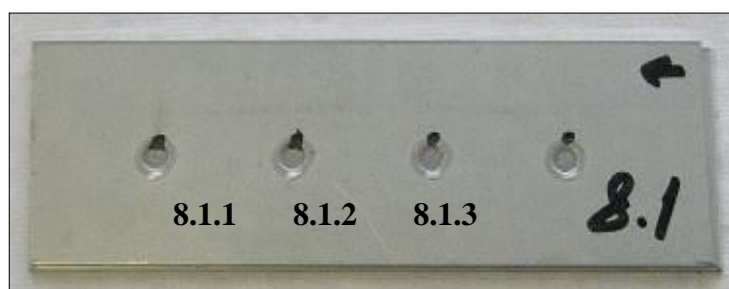


Рисунок 3.82 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 8.1

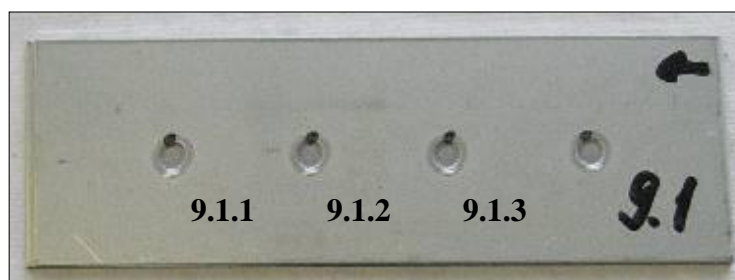


Рисунок 3.83 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 9.1

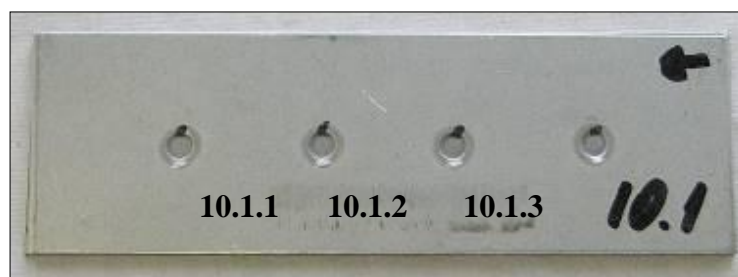


Рисунок 3.84 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 10.1



Рисунок 3.85 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 11.1

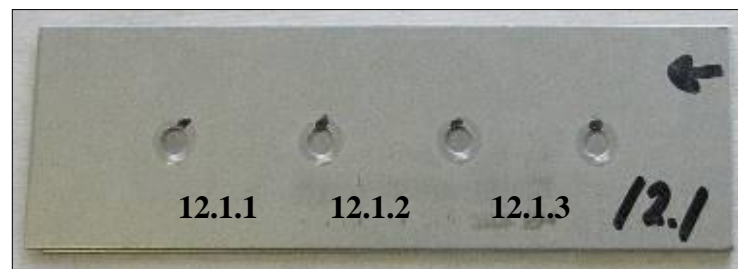


Рисунок 3.86 – Внешний вид точечной контактной сварки образца № 12.1



Рисунок 3.87 – Макроструктура сварной точки 8.1.1



Рисунок 3.88 – Макроструктура сварной точки 8.1.2



Рисунок 3.89 – Макроструктура сварной точки 8.1.3

Таблица 3.11 – Проверенные параметры сварных точек образца № 8.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) <u>Точка 8.1.1:</u> 5,68 мм × 1,50 мм <u>Точка 8.1.2:</u> 6,20 мм × 1,54 мм <u>Точка 8.1.3:</u> 6,08 мм × 1,50 мм
Глубина вмятины	<u>Точка 8.1.1:</u> g ≈ 0,24 мм; g ₁ ≈ 0,26 мм <u>Точка 8.1.2:</u> g ≈ 0,24 мм; g ₁ ≈ 0,23 мм <u>Точка 8.1.3:</u> g ≈ 0,23 мм; g ₁ ≈ 0,24 мм
Дефекты точек сварки	<u>Точка 8.1.1:</u> Дефекты в литом ядре max размером 0,05 мм × 0,06 мм, рисунок 3.90. <u>Точка 8.1.2:</u> Дефект в литом ядре размером 0,05 мм × 0,02 мм, рисунок 3.91. Несплавление длиной 0,22 мм, рисунок 3.92. <u>Точка 8.1.3:</u> Дефект в литом ядре размером 0,03 мм × 0,03 мм, рисунок 3.93.

Продолжение таблицы 3.11

Микроструктура	<p><u>Точки 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3</u> (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит, рисунок 3.94. ЗТВ – мартенсит, феррит, рисунок 3.95. Литое ядро – бейнит, мартенсит, рисунок 3.96.</p>
Твердость точки 8.1.1, HV1	<p>Схема расположения точек замеров точки 8.1.1, рисунок 3.97. Основной металл: 195; 208; 205 ЗТВ 1: 320 ; 328; 311 ЗТВ 2: 383; 384; 383 ЗТВ 3: 392; 392; 382 Литое ядро: 361; 381; 365; 368; 391; 351</p>
<p>¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки</p>	



Рисунок 3.90 – Дефект в литом ядре в сварной точке 8.1.1,
не травлено



Рисунок 3.91 – Дефект в литом ядре в сварной точке 8.1.2,
не травлено



Рисунок 3.92 – Несплавление в сварной точке 8.1.2,
не травлено



Рисунок 3.93 – Дефект в литом ядре в сварной точке 8.1.3,
не травлено

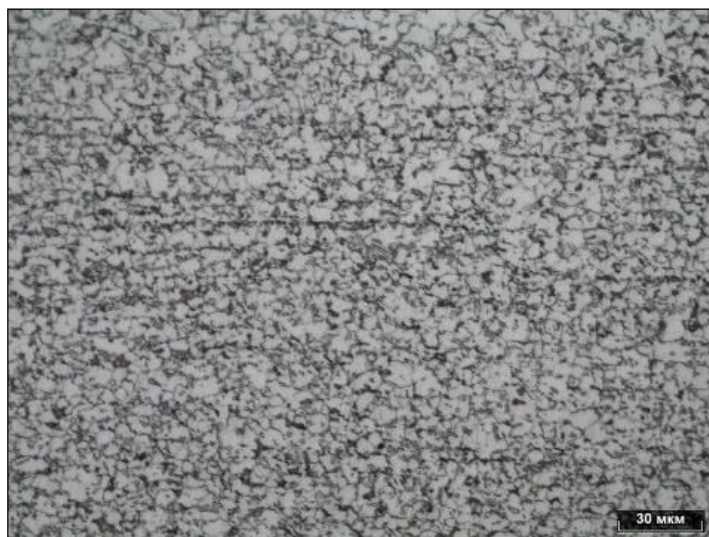


Рисунок 3.94 – Микроструктура проката вне зон сварки, точка 8.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.95 – Микроструктура ЗТВ точки 8.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.96 – Микроструктура зоны литого ядра точки 8.1.1,
травитель – нитал



Рисунок 3.97 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 8.1.1



Рисунок 3.98 – Макроструктура сварной точки 9.1.1



Рисунок 3.99 – Макроструктура сварной точки 9.1.2



Рисунок 3.100 – Макроструктура сварной точки 9.1.3

Таблица 3.12 – Проверенные параметры сварных точек образца № 9.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 9.1.1: 6,05 мм × 1,52 мм Точка 9.1.2: 6,24 мм × 1,64 мм Точка 9.1.3: 6,11 мм × 1,57 мм
Глубина вмятины	Точка 9.1.1: $g \approx 0,22$ мм; $g_1 \approx 0,21$ мм Точка 9.1.2: $g \approx 0,21$ мм; $g_1 \approx 0,20$ мм Точка 9.1.3: $g \approx 0,23$ мм; $g_1 \approx 0,20$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 9.1.1: Дефекты в литом ядре тах размером 0,05 мм × 0,04 мм, рисунок 3.101. Точка 9.1.2: Дефекты в литом ядре тах размером 0,04 мм × 0,05 мм, рисунок 3.102. Точка 9.1.3: Дефекты в литом ядре тах размером 0,08 мм × 0,08 мм, рисунок 3.103.
Микроструктура	Точки 9.1.1, 9.1.2, 9.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит. ЗТВ - мартенсит, феррит. Литое ядро – бейнит, мартенсит.
Твердость точки 9.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 9.1.1, рисунок 3.104. Основной металл: 190; 190; 190 ЗТВ 1: 287 ; 299; 311 ЗТВ 2: 393; 380; 394 ЗТВ 3: 386; 385; 385 Литое ядро: 355; 382; 375; 372; 373; 374
¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.101 – Дефект в литом ядре в сварной точке 9.1.1,
не травлено



Рисунок 3.102 – Дефект в литом ядре в сварной точке 9.1.2,
не травлено



Рисунок 3.103 – Дефект в литом ядре в сварной точке 9.1.3,
не травлено



Рисунок 3.104 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 9.1.1



Рисунок 3.105 – Макроструктура сварной точки 10.1.1



Рисунок 3.106 – Макроструктура сварной точки 10.1.2



Рисунок 3.107 – Макроструктура сварной точки 10.1.3

Таблица 3.13 – Проверенные параметры сварных точек образца № 10.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) <u>Точка 10.1.1:</u> 5,85 мм × 1,51 мм <u>Точка 10.1.2:</u> 6,02 мм × 1,57 мм <u>Точка 10.1.3:</u> 5,92 мм × 1,55 мм
Глубина вмятины	<u>Точка 10.1.1:</u> $g \approx 0,22$ мм; $g_1 \approx 0,21$ мм <u>Точка 10.1.2:</u> $g \approx 0,22$ мм; $g_1 \approx 0,21$ мм <u>Точка 10.1.3:</u> $g \approx 0,21$ мм; $g_1 \approx 0,21$ мм
Дефекты точек сварки	<u>Точка 10.1.1:</u> Дефекты в литом ядре тах размером 0,09 мм × 0,07 мм, рисунок 3.108. <u>Точка 10.1.2:</u> Дефекты в литом ядре тах размером 0,11 мм × 0,07 мм, рисунок 3.109. <u>Точка 10.1.3:</u> Дефекты в литом ядре тах размером 0,04 мм × 0,03 мм, рисунок 3.110.
Микроструктура	<u>Точки 10.1.1, 10.1.2, 10.1.3</u> (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит. ЗТВ - мартенсит, феррит. Литое ядро – бейнит, мартенсит.
Твердость точки 10.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 10.1.1, рисунок 3.111. Основной металл: 182; 182; 187 ЗТВ 1: 306 ; 323; 315 ЗТВ 2: 391; 382; 392 ЗТВ 3: 372; 373; 376 Литое ядро: 369; 377; 358; 365; 349; 377

1) - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки



Рисунок 3.108 – Дефект в литом ядре в сварной точке 10.1.1,
не травлено



Рисунок 3.109 – Дефект в литом ядре в сварной точке 10.1.2,
не травлено



Рисунок 3.110 – Дефект в литом ядре в сварной точке 10.1.3,
не травлено



Рисунок 3.111 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 10.1.1



Рисунок 3.112 – Макроструктура сварной точки 11.1.1



Рисунок 3.113 – Макроструктура сварной точки 11.1.2



Рисунок 3.114 – Макроструктура сварной точки 11.1.3

Таблица 3.14 – Проверенные параметры сварных точек образца № 11.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) <u>Точка 11.1.1:</u> 5,98 мм × 1,63 мм <u>Точка 11.1.2:</u> 5,77 мм × 1,60 мм <u>Точка 11.1.3:</u> 6,03 мм × 1,56 мм
Глубина вмятины	<u>Точка 11.1.1:</u> $g \approx 0,20$ мм; $g_1 \approx 0,20$ мм <u>Точка 11.1.2:</u> $g \approx 0,19$ мм; $g_1 \approx 0,19$ мм <u>Точка 11.1.3:</u> $g \approx 0,20$ мм; $g_1 \approx 0,19$ мм
Дефекты точек сварки	<u>Точка 11.1.1:</u> Дефект в литом ядре размером 0,08 мм × 0,05 мм, рисунок 3.115. <u>Точка 11.1.2:</u> Дефект в литом ядре размером 0,1 мм × 0,06 мм, рисунок 3.116. <u>Точка 11.1.3:</u> Дефекты в литом ядре max размером 0,12 мм × 0,03 мм, рисунок 3.117.
Микроструктура	Точки 11.1.1, 11.1.2, 11.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит. ЗТВ - мартенсит, феррит. Литое ядро – бейнит, мартенсит.
Твердость точки 11.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 11.1.1, рисунок 3.118. Основной металл: 193; 187; 184 ЗТВ 1: 294 ; 271; 260 ЗТВ 2: 363; 393; 395 ЗТВ 3: 382; 392; 395 Литое ядро: 368; 380; 384; 366; 353; 367

1) - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки



Рисунок 3.115 – Дефект в литом ядре в сварной точке 11.1.1,
не травлено



Рисунок 3.116 – Дефект в литом ядре в сварной точке 11.1.2,
не травлено



Рисунок 3.117 – Дефект в литом ядре в сварной точке 11.1.3,
не травлено



Рисунок 3.118 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 11.1.1



Рисунок 3.119 – Макроструктура сварной точки 12.1.1



Рисунок 3.120 – Макроструктура сварной точки 12.1.2



Рисунок 3.122 – Макроструктура сварной точки 12.1.3

Таблица 3.15 – Проверенные параметры сварных точек образца № 12.1

Параметр	Фактические значения ¹⁾
Размеры литого ядра	(диаметр × высота) Точка 12.1.1: 6,05 мм × 1,53 мм Точка 12.1.2: 5,98 мм × 1,62 мм Точка 12.1.3: 5,91 мм × 1,62 мм
Глубина вмятины	Точка 12.1.1: $g \approx 0,18$ мм; $g_1 \approx 0,17$ мм Точка 12.1.2: $g \approx 0,18$ мм; $g_1 \approx 0,17$ мм Точка 12.1.3: $g \approx 0,17$ мм; $g_1 \approx 0,17$ мм
Дефекты точек сварки	Точка 12.1.1: Дефект в литом ядре размером 0,11 мм × 0,09 мм, рисунок 3.123. Точка 12.1.2: Дефекты в литом ядре тах размером 0,07 мм × 0,05 мм, рисунок 3.124. Точка 12.1.3: Дефекты в литом ядре тах размером 0,55 мм × 0,06 мм, рисунок 3.125.
Микроструктура	Точки 12.1.1, 12.1.2, 12.1.3 (основные составляющие микроструктуры): Основной металл – феррит, мартенсит. ЗТВ - мартенсит, феррит. Литое ядро – бейнит, мартенсит.
Твердость точки 12.1.1, HV1	Схема расположения точек замеров точки 12.1.1, рисунок 3.126. Основной металл: 198; 190; 200 ЗТВ 1: 253 ; 257; 253 ЗТВ 2: 351; 396; 383 ЗТВ 3: 394; 376; 381 Литое ядро: 369; 359; 357; 360; 349; 373
¹⁾ - замеры производились в плоскости шлифа, приближенном к диаметральному сечению сварной точки	



Рисунок 3.123 – Дефект в литом ядре в сварной точке 12.1.1,
не травлено



Рисунок 3.124 – Дефект в литом ядре в сварной точке 12.1.2,
не травлено



Рисунок 3.125 – Дефект в литом ядре в сварной точке 12.1.3,
не травлено



Рисунок 3.126 – Схема замеров твердости HV1 сварной точки 12.1.1

3.3 Сравнительный анализ результатов исследования

В ходе исследований описанных выше, для наглядности изменения механических свойств образцов и изменения твердости зон ЗТВ, литого ядра и переходных зон на рисунках 3.127-3.134... представлены результаты исследований

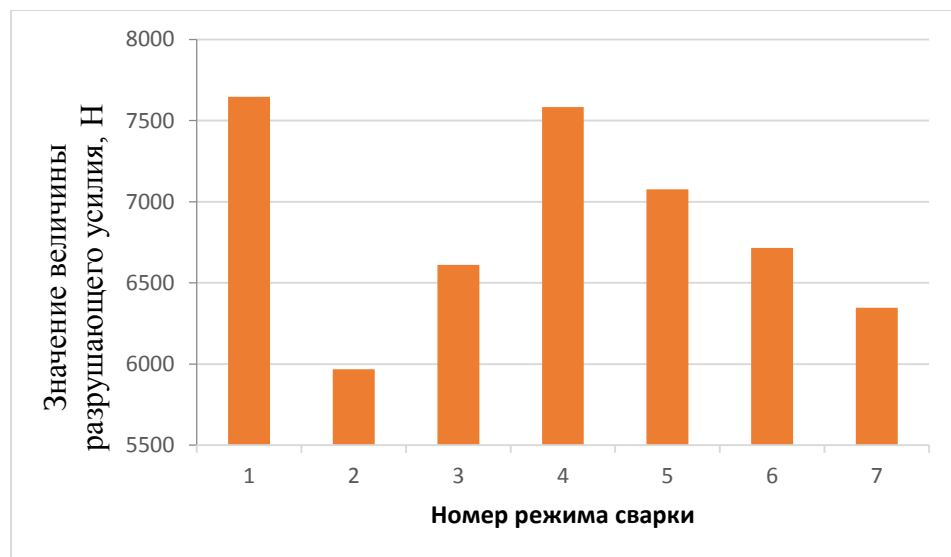


Рисунок 3.127- Зависимость величины разрушающего усилия при испытаниях на отрыв от выбранного номера режима сварки

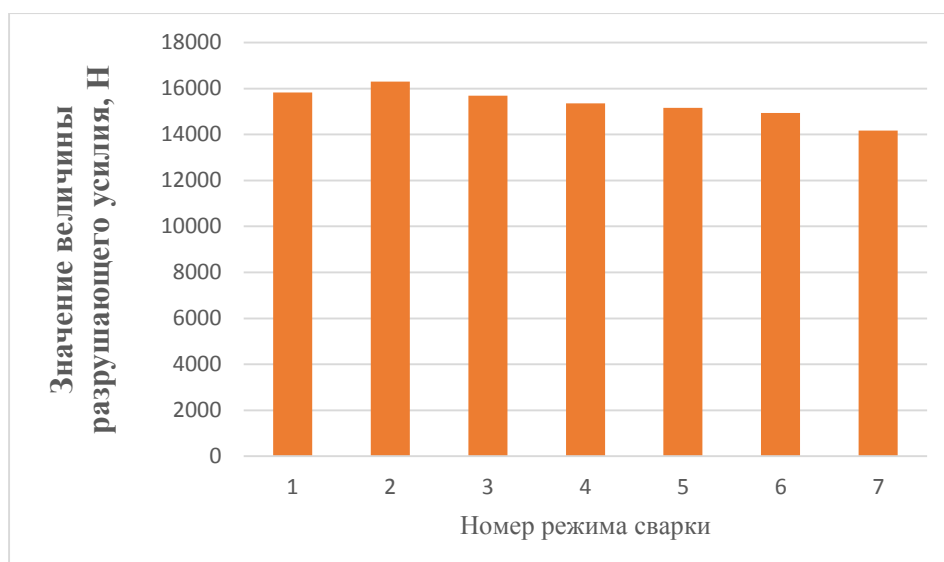


Рисунок 3.128 - Зависимость величины разрушающего усилия при испытаниях на срез от выбранного номера режима сварки

Исходя из графиков выбран режим с временем паузы между основным и дополнительным импульсом тока в 6 периодов.

Далее выбрано время приложения термообрабатывающего импульса.

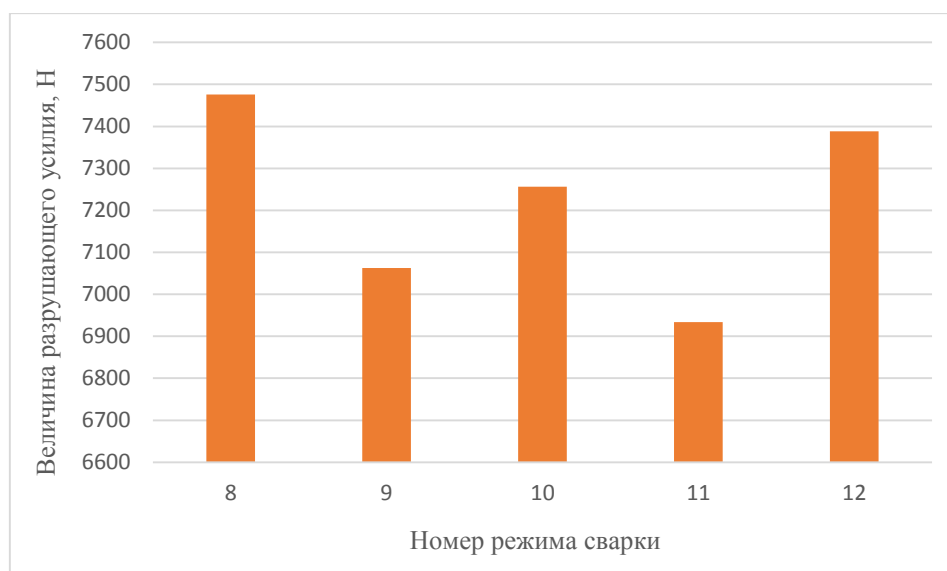


Рисунок 3.129 - Зависимость величины разрушающего усилия при отрыве от номера режима сварки

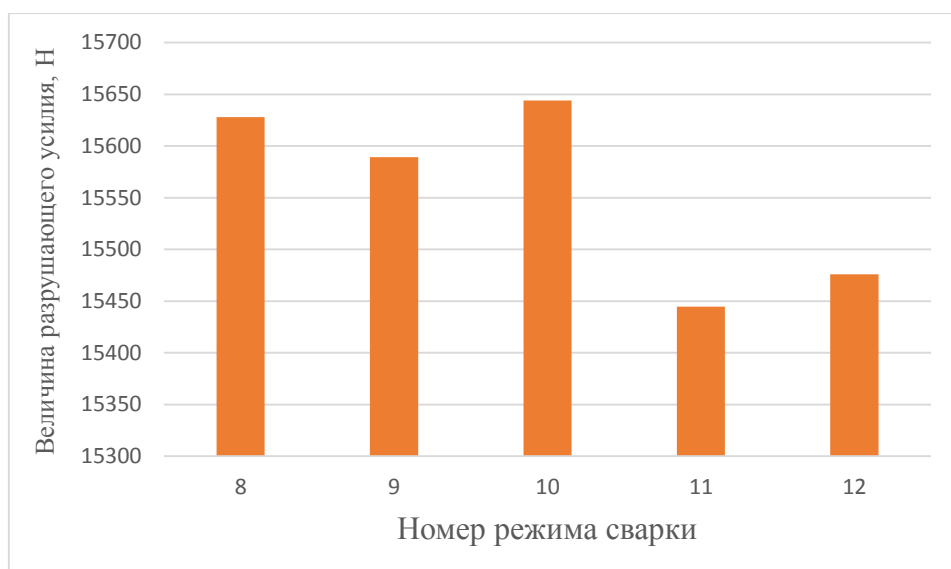


Рисунок 3.130 - Зависимость величины разрушающего усилия при срезе от номера режима сварки

Исходя из графиков выбран режим с временем приложения дополнительного импульса тока в 14 периодов.

Также при подборе режимов сварки учитывалось изменение величины литого ядра при соответствующем режиме сварки, рисунки 3.131 – 3.132

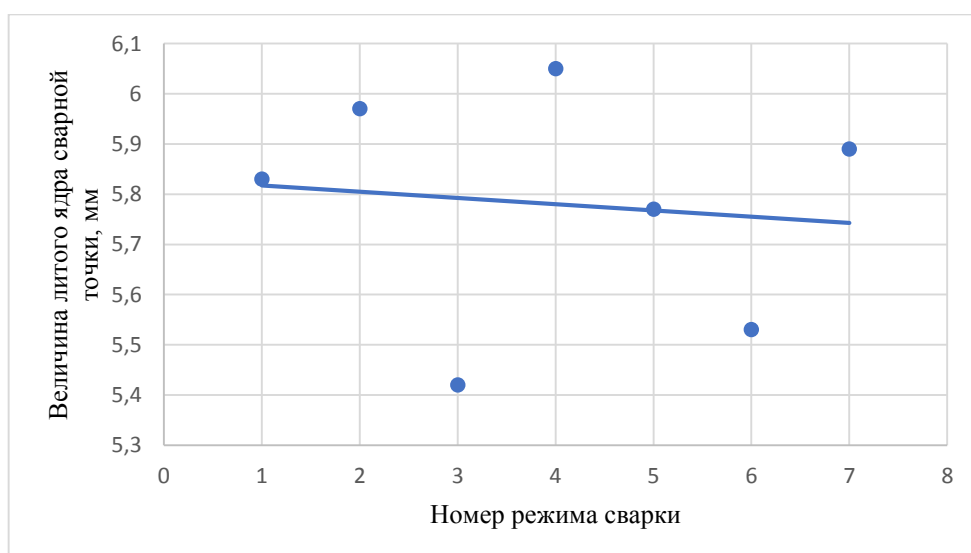


Рисунок 3.131- Зависимость величины литого ядра сварной точки после испытаний на отрыв от номера режима сварки

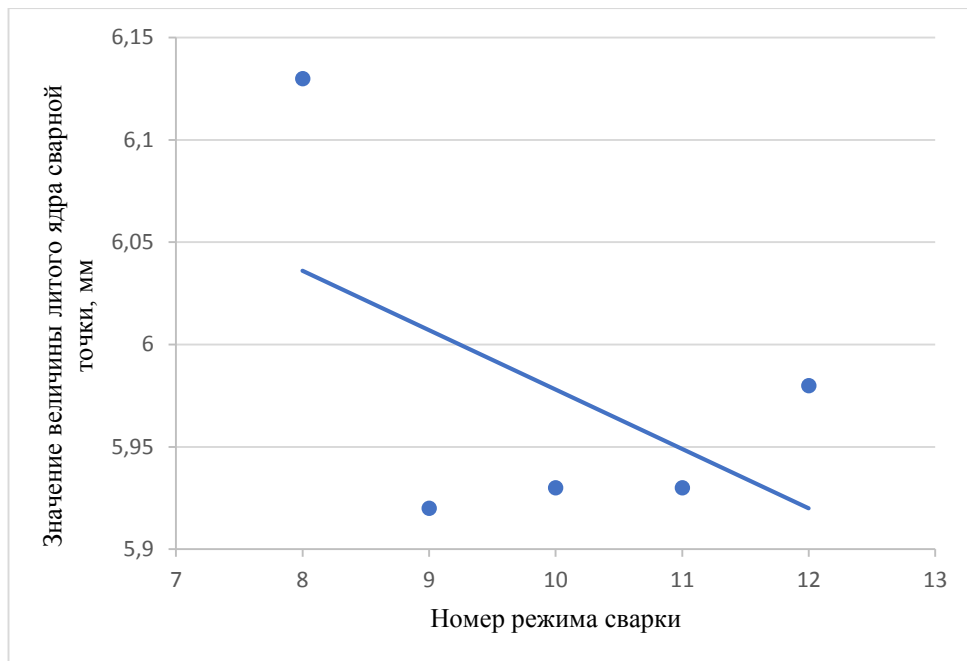


Рисунок 3.132 - Зависимость величины литого ядра сварной точки после испытаний на срез от номера режима сварки

Исходя из графиков хорошо прослеживается стойкое снижение величины диаметра литого ядра сварной точки при увеличении времени паузы между основным и дополнительным сварочным импульсом тока.

Также учитывалось изменение твердости переходных зон, зон ЗТВ и литого ядра сварной точки, рисунки 3.133 - 3.134

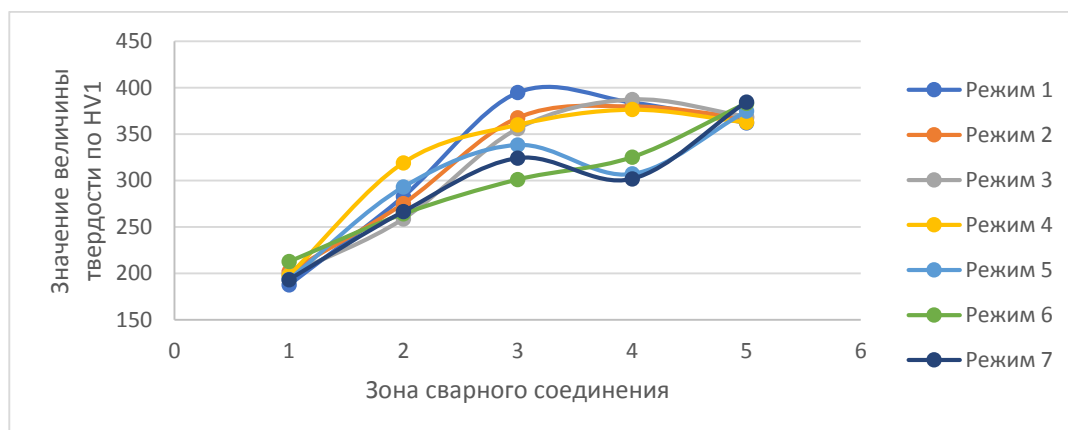


Рисунок 3.133 - Изменение твердости зон литого металла от выбранного параметра режима с изменением времени паузы

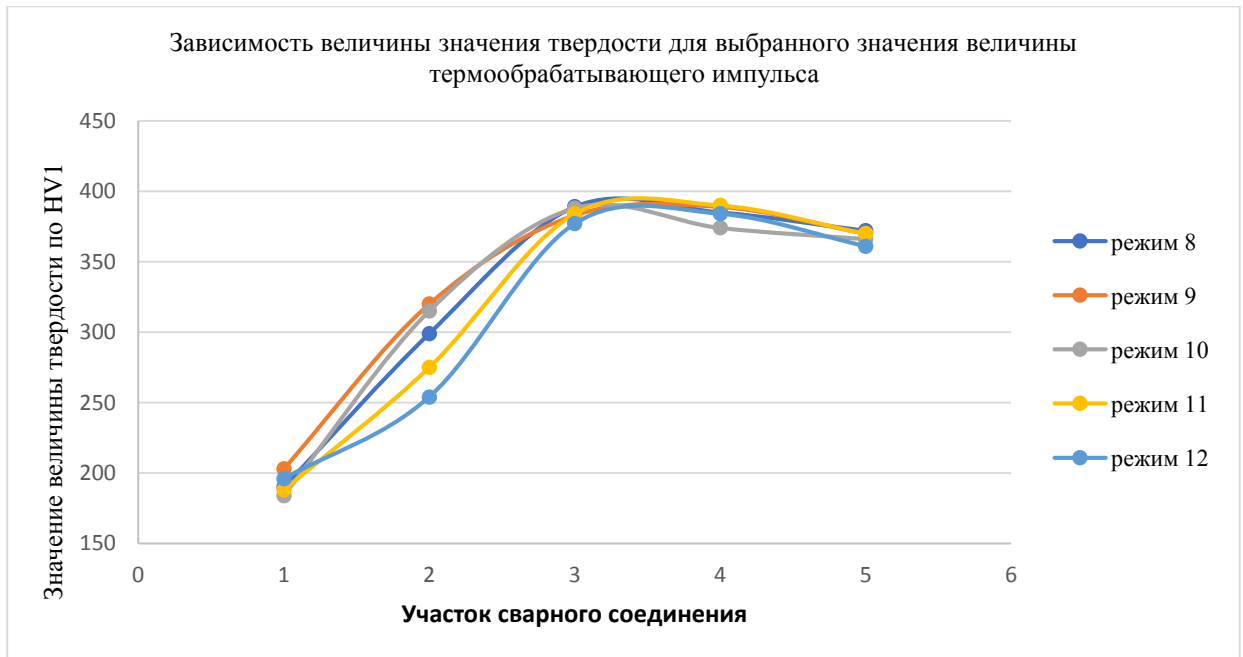


Рисунок 3.134 - Изменение твердости зон литого металла от выбранного параметра режима с изменением времени приложения дополнительного импульса

Заключение по разделу

В ходе выполнения раздела осуществлен анализ полученных результатов после серии сварок и механических испытаний.

Выполнены серии сварок с целью определения диапазона свариваемости листового оцинкованного проката толщиной 1,2 мм стали DP600 без применения термообрабатывающего импульса в соответствии с EN ISO 18278-2. Оценено влияние на механические свойства сварного соединения. Проведен анализ влияние дополнительного термообрабатывающего импульса на диапазон свариваемости листового оцинкованного проката марки DP600, толщиной 1,2 мм. Проведен анализ влияния дополнительного термообрабатывающего импульса на твердость литого ядра сварной точки и прилегающих зон.

В ходе проведения анализа сделаны соответствующие выводы

Заключение

Целью исследования является расширение диапазона свариваемости листового горячеоцинкованного проката марки DP600 толщиной 1,2 мм.

В результате данной квалификационной работы исследованы свойства листового стального проката отечественного производства [32] и горячеоцинкованного проката DP600. Проведена оценка дефектов неразъемных соединений при контактной точечной сварке по стандартам EN ISO 18278-2 2016.

Проведенные работы позволили разработать методику исследований влияния параметров режима контактной точечной сварки на механические свойства листового проката DP600. Спроектировать технологический процесс к.т.с. с применением термообрабатывающего импульса тока с регулируемой длительностью паузы. Определить влияние параметров режима контактной точечной сварки на механические свойства листового проката DP600, которые автор изложил в статье [32].

Исходя из данных полученных в ходе выполнения поставленных задач диапазон свариваемости с применением дополнительного импульса тока составил (6,7 - 8,4) кА (1700 А), против 6,6 кА – 8 кА (1400 А) на стандартных режимах, изложенных в ENISO 18278-2. Появление стабильного выплеска наблюдалось на токе в 8,6 кА.

Проведенный металлографический анализ образцов на выбранных режимах показал хорошие результаты. Проведен замер твердости, который подтвердил влияние параметра режима на изменение твердости сварной точки.

Результаты механических испытания образцов сваренных с термообрабатывающим импульсом тока и заданной длительностью паузы позволяют рекомендовать разработанный технологический процесс для сварки листового горячеоцинкованного проката DP600 в соответствии с требованиями изложенными в EN ISO 18278-2.

Цель исследования считаю полностью достигнутой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abbasi, M.; Ketabchi, M.; Ramazani, A.; Abbasi, M.; Prael, U. Investigation into the effects of weld zone and geometric discontinuity on the formability reduction of tailor welded blanks. *Comput. Mater. Sci.* 2012, 59. PP. 158–164. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025612001279>
2. Cho Y., Rhee S. Experimental study of nugget formation in resistance spot welding// *Welding research.* 2003. PP. 195-201. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/b325/21eebf43670c8ba05e08c7303ede9ed4090.pdf?_ga=2.172010403.1041749482.1589197098-566695408.1588955793
3. Cornette, D.; Hourman, T.; Hudin, O.; Laurent, J.P.; Reynaert, A. High Strength Steels for Automotive Safety Parts. *SAE Trans. J. Mater. Manuf.* 2001, 110. PP. 37–47. URL: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0078>
4. General Motors Engineering Standards, Automotive Resistance Spot Welding, GM 4488M, Aug. 1995.
5. Ghosh, P. K., Gupta, P. C., Ramavtar, A., and Jha, B. K. 1991. *Welding Journal* Volume: 71. Issue 1. PP. 7-14.
6. H
uin T., Dancette S., Fabregue D., Dupuy T. Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds// *Metals.* 2016. Volume 6. Issue 3. PP. 111. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/6/5/111/htm>
7. ISO 18278-2:2016. Resistance welding – Weldability – Part 2: Evaluation procedures for weldability in spot welding.
8. Ma, C.; Chen, D.L.; Bhole, S.D.; Boudreau, G.; Lee, A.; Biro, E. Microstructure and Fracture Characteristics of Spot-Welded DP600 Steel. *Mater. Sci. Eng. A* 2008, 485. PP. 334–346. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509307015353>
9. Marya M., Gayden Q. Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels - Part 1 - The causes of interfacial fracture// *Welding research.* 2005. PP. 172-181. URL: <https://mafiadoc.com/development-of-requirements-for-resistance-spot-welding-dual-59c2d0141723dd3c81fd77f6.html>

10. Militky, M., Pakalnins, Jiang, C., and Thompson, A. K. 2003. SAE Technical Paper 2003-01-0520.
11. Mukherjee, K.; Ramazani, A.; Yang, L.; Prah, U.; Bleck, W.; Reisen, U. Characterization of gas metal arc welded hot rolled DP600 steel. *Steel Res. Int.* 2011, 82. PP. 1408–1416. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.201100152>
12. Ramazani, A.; Bruehl, S.; Gerber, T.; Bleck, W.; Prah, U. Quantification of bake hardening effect in DP600 and TRIP700 steels. *Mater. Des.* 2014, 57. PP. 479–486. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306914000120>
13. Ramazani, A.; Ebrahimi, Z.; Prah, U. Study the effect of martensite banding on the failure initiation in dual-phase steel. *Comput. Mater. Sci.* 2014, 87. PP. 241–247. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-020-00457-z>
14. Ramazani, A.; Li, Y.; Mukherjee, K.; Prah, U.; Bleck, W.; Abdurakhmanov, A.; Schleser, M.; Reisgen, U. Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding. *Comput. Mater. Sci.* 2013, 68. PP. 107–116. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025612005484>
15. Ramazani A., Mukherjee K., Abdurakhmanov A., Abbasi M., Prah U. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded DP600 Steel// *Metals*. 2015. Volume 5. Issue 3. PP. 1704-1716. URL: <https://doi.org/10.3390/met5031704>
16. Ramazani, A.; Mukherjee, K.; Abdurakhmanov, A.; Prah, U.; Schleser, M.; Reisgen, U.; Bleck, W. Micro-Macro Characterisation and Modelling of Mechanical Properties of Gas Metal Arc Welded (GMAW) DP600 Steel. *Mater. Sci. Eng. A* 2014, 589. PP. 1–14. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509313010320>
17. Ramazani, A.; Mukherjee, K.; Prah, U.; Bleck, W. Modelling the Effect of Microstructural Banding on the Flow Curve Behaviour of Dual-Phase (DP) Steels. *Comput. Mater. Sci.* 2012, 52. PP. 46–54. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025611003144>

18. Ramazani, A.; Mukherjee, K.; Prahl, U.; Bleck, W. Transformation-Induced, Geometrically Necessary, Dislocation-Based Flow Curve Modeling of Dual-Phase Steels: Effect of Grain Size. *Metall. Mater. Trans. A* 2012, *43*. PP. 3850–3869. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-012-1196-3>
19. Ramazani, A.; Mukherjee, K.; Quade, H.; Prahl, U.; Bleck, W. Correlation between 2D and 3D flow curve modelling of DP steels using a microstructure-based RVE approach. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, *560*. PP. 129–139. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509312013603>
20. Ramazani, A.; Mukherjee, K.; Schwedt, A.; Goravanchi, P.; Prahl, U.; Bleck, W. Quantification of the Effect of Transformation-Induced Geometrically Necessary Dislocations on the Flow-Curve Modelling of Dual-Phase Steels. *Int. J. Plasticity* 2013, *43*. PP. 128–152. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0749641912001684>
21. Ramazani, A.; Schwedt, A.; Aretz, A.; Prahl, U. Failure Initiation in Dual-Phase Steel. *Key Eng. Mater.* 2014, *586*. PP. 67–71. URL: <https://www.scientific.net/KEM.586.67>
22. Rathbun, R. W., Matlock, D. K., and Speer, J. G. 2003. *Welding Journal* 79(8): PP. 207-218.
23. Reisgen, U.; Harms, A.; Ohse, P.; Schiebahn, A. Fracture Behaviour of Resistance Spot Welds on High-Strength and Higher-Strength Steels. *Weld. Cut.* 2009, *8*. PP. 148–151.
24. Shaw, J.R.; Zuidema, B.K. New High Strength Steels Help Automakers Reach Future Goals for Safety, Affordability, Fuel Efficiency and Environmental Responsibility. *SAE Trans. J. Mater. Manuf.* 2001, *110*. PP. 976–983. URL: <https://saemobilus.sae.org/content/2001-01-3041/>
25. Shi, G.; Westgate, S.A. Resistance Spot Welding of High Strength Steels. *Int. J. Join. Mater.* 2004, *16*. PP. 9–14. URL: https://www.researchgate.net/publication/286293354_Resistance_spot_welding_of_high_strength_steels
26. Svenson, L. E., and Larsson, J. K. 2002. *Steel World*, 7: 21–26.

27. Wang, W.; Li, M.; He, C.; Wei, X.; Wang, D.; Du, H. Experimental Study on High Strain Rate Behavior of High Strength 600–1000 MPa Dual Phase Steels and 1200 MPa Fully Martensitic Steels. *Mater. Des.* 2013, 47. PP. 510–521. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306912008977>
28. Zhang, H.; Wei, A.; Qiu, X.; Chen, J. Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Dissimilar Thickness DP780/DP600 Dual-Phase Steel Joints. *Mater. Des.* 2014, 54. PP. 443–449. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306913007711>
29. Zhao, D.; Wang, Y.; Zhang, L.; Zhang, P. Effects of Electrode Force on Microstructure and Mechanical Behavior of the Resistance Spot Welded DP600 Joint. *Mater. Des.* 2013, 50. PP. 72–77. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026130691300112X>
30. А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров и др. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
31. Двухфазные стали: сайт – URL: <https://xn--80awbhbdcfеu.su/dvufaz/> (Дата обращения 20.12.2019). – Текст: электронный.
32. Маркин, Е.В. Маркин. Оценка свариваемости точечной контактной сваркой двухфазной высокопрочной стали НСТ780Х: Бакалаврская работа/ Е.В.Маркин. – Тольятти, 2019. - 68 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/9912>