

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА  
Рецензент, к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ И.Н. Ермаков  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой, д.т.н.,  
профессор  
\_\_\_\_\_ Г. Г. Михайлов  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Освоение горячекатаного арматурного проката класса А400С  
по ГОСТу 34028-2016

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ-22.04.02.2019.153 ПЗ ВКР

Руководитель проекта  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Н.А. Шабурова  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта  
Студент группы П-243  
\_\_\_\_\_ В.О. Печников  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Н.А. Шабурова  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Печников В.О. Освоение горячекатаного арматурного проката класса А400С – Челябинск: ЮУрГУ, П-243, 2019. – 63 с., 32 ил., 9 табл., библиогр. список – 8 наим.

В работе рассматривается технология горячей прокатки арматуры класса А400С по ГОСТу 34028-2016. Проведены: исследование химического состава готовой продукции, состав неметаллических включений, металлографические исследования и измерения твёрдости. Установлены причины возникновения неудовлетворительных результатов арматуры по показателям механических характеристик.

На основании полученных результатов предложены меры по недопущению брака в будущем и ужесточению контроля за соблюдением технологии прокатки на предприятии.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 6  |
| 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....   | 7  |
| 1.1 Общие сведения о производстве арматурной стали.....               | 7  |
| 1.2 Классификация и стандартизация профилей стержневой арматуры. .... | 13 |
| 1.3 Влияние режима нагрева на механические свойства арматурной стали  | 18 |
| 1.4 Прокатка арматурной стали на непрерывных станах .....             | 21 |
| 1.5 Постановка цели и задач исследования.....                         | 25 |
| 2. МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ .....                         | 26 |
| 2.1. Проблемы выбора марки арматурной стали .....                     | 26 |
| 2.2. Испытательное оборудование .....                                 | 28 |
| 2.3. Методика испытания .....   | 30 |
| 3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ .....                                     | 35 |
| 3.1. Отбор образцов.....  | 35 |
| 3.2. Исследование химического состава и неметаллических включений.... | 37 |
| 3.3. Металлографический анализ .....                                  | 49 |
| 3.4. Результаты механических испытаний .....                          | 59 |
| 3.5. Выводы.....  | 60 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 62 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....  | 63 |

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие производства арматурной стали в настоящее время идет в направлении улучшения качества металла, совершенствования технологии прокатки и термической обработки, рационализации конструкции профиля.

Это позволяет получать значительную экономию металла при использовании арматуры. В связи с этим возникает необходимость значительного расширения производства экономичных видов стержневой арматуры из углеродистых и низколегированных сталей, упрочняемых с прокатного нагрева, позволяющей получить экономию металла при использовании арматурной стали периодического профиля в строительстве.

Переход на новые эффективные виды металлопроката вызывает ряд проблем, от успешного решения которых будет зависеть освоение производства и применение периодических арматурных профилей. Часть этих проблем связана с использованием новых видов арматурных сталей, обладающих наряду с высоким уровнем механических характеристик комплексом специальных свойств таких, как свариваемость, стойкость, выносливость при повторных переменных нагрузках, упрочняемость в горячем и холодном состояниях.

Существенное влияние на технологию прокатного производства оказывает применяемый материал и конструкция профиля. Специфика прокатки новых видов стали состоит в условиях ее нагрева, окалинообразования и обезуглероживания. Конструкция профиля оказывает влияние на технологию изготовления инструмента, его износостойкость, технологичность прокатки и отделки[1].

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### 1.1 Общие сведения о производстве арматурной стали.

Эксплуатационные характеристики горячекатаной арматурной стали периодического профиля должны обеспечивать высокий уровень механических свойств, надежное сцепление арматуры с бетоном и технологичность переработки профиля при изготовлении железобетонных конструкций.

Механические свойства арматуры характеризуются тремя основными показателями: статической прочностью, усталостной прочностью и пластичностью. Статическая прочность определяется пределом текучести материала, по которому назначают расчетные коэффициенты нагружения. Повышение прочности является наиболее эффективным путем экономии металла при производстве железобетонных конструкций. Необходимо учитывать, что повышение прочностных характеристик металла, как правило, приводит к снижению пластичности, что при определенных условиях эксплуатации арматуры вызывает снижение несущей способности конструкций.

В последние годы стержневая арматура периодического профиля находит все более широкое применение в качестве рабочего элемента в мостостроении. Это обстоятельство предопределило требования к повышению усталостной прочности арматуры, работающей в условиях многократно изменяющихся нагрузок.

Статическая прочность, арматуры и ее пластичность взаимосвязаны и определяются химическим составом стали, из которой изготовлен профиль. В настоящее время существуют два направления совершенствования этих параметров: повышение содержания углерода в стали с добавкой легирующих элементов и термическое упрочнение арматурной стали. Каждое из этих направлений имеет свои преимущества и недостатки.

Химический состав и термоупрочнение оказывают влияние на ряд специфических требований, предъявляемых к арматурным сталям для железобетона (коррозионная стойкость, свариваемость, стойкость в условиях низких и высоких температур). Анализируя факторы, влияющие на механические свойства периодических арматурных профилей, необходимо отметить, что, помимо химического состава материала, на усталостную прочность и технологию упрочнения прямое влияние оказывает конструкция профиля.

Многочисленными исследованиями установлено, что наличие на поверхности профиля периодически расположенных неровностей в виде выступов или впадин в значительной степени снижает выносливость арматуры. Это связано с возникновением концентраторов напряжений на поверхности стержня.

При термическом упрочнении периодической арматурной стали на условия охлаждения и, соответственно, формирования заданной структуры и свойств существенное влияние оказывает форма поперечного сечения, размеры профиля и его элементов.

Важным фактором, обеспечивающим работу арматуры, является их сцепление. Увеличение уровня сцепления уменьшает ширину раскрытия трещин, улучшает анкеровку стержней, что позволяет использовать в железобетоне арматурную сталь повышенной прочности, увеличивая тем самым несущую способность конструкций. Уровень сцепления зависит от размеров и взаимного расположения выступов или впадин на поверхности стержня, т.е. от конструкции профиля.

При изготовлении железобетонных конструкций арматурные профили подвергаются резке, правке, сварке, предварительному натяжению и другим операциям. Для обеспечения качественной сварки помимо соответствующего

химического состава и структуры свариваемых материалов существенным является геометрия профиля, т.е. форма и размеры его элементов. Получение качественного сварного узла требует увеличения поверхности контакта в месте сварки и симметричности профиля для однообразной ориентации стержня. Использование в последнее время разъемных стыковых соединений арматурных стержней при помощи резьбы или хомутов также требует определенной формы и размеров профиля. При изготовлении железобетонных конструкций широко применяют предварительное натяжение арматуры. Это ограничивает ширину трещин в бетоне, повышает жесткость и выносливость конструкций. Для предварительного натяжения арматуры используют анкерные устройства на концах стержня в виде концов с резьбой, высаженных (утолщенных) головок, сплюснутых концов, петли и т.д. При изготовлении анкерных устройств форма и размеры профиля влияют на технологию и производительность оборудования для предварительного натяжения.

Одним из направлений в производстве периодической арматурной стали является прокатка профилей в бунтах или мотках. Такой вид продукции позволяет более полно использовать металл при раскраве и добиться его значительной экономии. Кроме того, использование проката в бунтах способствует автоматизации и механизации процесса его переработки. Основным оборудованием для переработки бунтового проката служат разматывающие и плавильные машины, условия, работы которых зависят от конструкции профиля. Предпочтительными с этой точки зрения являются симметричные профили с минимальным, моментом сопротивления и малой скрученностью.

Таким образом, анализируя эксплуатационные характеристики периодических арматурных профилей, можно сделать вывод, что конструкция

профиля наряду с химическим составом стали, из которой он изготовлен, определяет комплекс требований, предъявляемых к арматуре.

Вопросы удовлетворения строительной индустрии арматурой высокого качества при значительных объемах производства невозможно рассматривать в отрыве от условий ее изготовления, которые предъявляют к конструкции профиля свои специфические требования. Существующий сортамент периодической арматурной стали включает большое число профилеразмеров от № 6 до № 80. В зависимости от профилеразмера арматурные профили производят на различных прокатных станах (проволочных, мелко-, средне- и крупносортовых). Конструктивные отличия каждого из указанных станов определяют специфику технологии прокатки и их производительность при производстве арматурных профилей.

Проволочные станы отличаются высокой скоростью прокатки (до 40 м/с), что наряду с малой площадью поперечного сечения прокатываемых профилей способствует потере продольной устойчивости профиля и застреванию его в трассе. Наличие моталок на этих станах создает дополнительные трудности, связанные с криволинейностью трассы на участке чистовая клеть – моталка. При прокатке термоупрочненных профилей криволинейность трассы вызывает значительный ее износ, что способствует застреванию раската. Сложным является обеспечение надежности съема полосы с валков чистовой клетки стана, так как наличие выступов на всей поверхности раската не позволяет приблизить носок выводной арматуры к валкам клетки[1].

Мелкосортные станы характеризуются скоростью прокатки в пределах 15–25 м/с. Основными причинами, сдерживающими производительность, являются скручивание профиля типа "спираль", обусловленное асимметричностью условий деформации относительно верхнего и нижнего



валков и недостаточная мощность ножниц при порезке термоупрочненного проката.

Среднесортные станы характеризуются скоростью прокатки до 17 м/с практически не производят арматуру, упрочненную с прокатного нагрева, и отличаются частыми перевалками валков чистовой клетки.

Крупносортовые станы не производят термоупрочненную арматуру. Из-за малой пропускной способности участка нагрева загрузка при прокатке арматурной стали составляет 70 – 90 % от возможной на стане; скорость прокатки на этих станах не превышает 7–8 м/с. Имеет место большая пружина чистовой клетки (до 3 мм) и частные перевалки валков чистовой группы.

Общей причиной, сдерживающей производительность всех групп станов при прокатке арматуры периодического профиля, является малая стойкость инструмента (36 – 100 т на 1 калибр валка). Необходимо отметить, что валки чистовых клеток станов, прокатывающих арматуру, выполнены из легированных белых чугунов с твердостью 58 – 65 HSD, что повышает трудоемкость их обработки. Малая стойкость инструмента обусловлена с одной стороны сложной конфигурацией наклонных винтовых канавок на поверхности ручья, а с другой – высокой степенью деформации в чистовом калибре, необходимой для выполнения профиля[1,2].

В зависимости от типа стана, на котором производится периодический арматурный профиль, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к его конструкции:

1) проволочные станы – симметричность профиля относительно верхнего и нижнего валков; наличие гладкого дна калибра для съема полосы с валков; увеличение шага наклонных выступов до 40 мм: уменьшение угла

наклона выступов к образующей профиля до  $30^\circ$ ; увеличение поля допусков на ширину наклонных выступов;

2) мелкосортные станы – симметричность профиля относительно верхнего и нижнего валков; увеличение шага наклонных выступов до 25 мм; уменьшение угла наклона выступов к образующей профиля до  $40^\circ$ ; увеличение поля допуска на ширину наклонных выступов;

3) среднесортные и крупносортные станы – изменение конфигурации профиля для улучшения условий термообработки и повышение вытяжной способности чистового калибра при меньшем его износе; увеличение поля допуска на ширину наклонных выступов; увеличение шага наклонных выступов до 25 мм[2].

Требования к конструктивным элементам периодического арматурного профиля в зависимости от факторов, влияющих на его эксплуатационные параметры и технологию производства, в некоторых случаях имеют альтернативный характер, в связи с чем возникает задача оптимизации конструкции профиля, позволяющей наиболее полно учесть весь комплекс предъявляемых к нему требований[1].

## **1.2 Классификация и стандартизация профилей стержневой арматуры.**

В зависимости от механических и специальных свойств арматурная сталь периодического профиля делится на классы. За основную характеристику принимается значение минимального гарантированного предела текучести, который считается нормативным сопротивлением арматуры. Для горячекатаной арматурной стали периодического профиля установлены классы А-II; А-III; А-IV; А-V; А-VI.

В качестве ненапрягаемой арматуры используют классы А-II и А-III. Для предварительно напряженной арматуры применяют сталь классов А-IV и А-V. Горячекатаная арматурная сталь при обычной технологии изготовления достаточно пластична, хорошо сваривается, имеет предел текучести не более 700 МПа, т.е. относится к классу А-III. Повышение прочностных характеристик достигают термическим упрочнением, что позволяет использовать ее для армирования элементов с высокой прочностью бетона. Классификация арматурных сталей по прочности предусматривает повышение предела текучести при переходе от класса к классу в среднем на 27,2 % (20 – 33 %).

На данный момент действует химический состав, и технология изготовления практически всех классов горячекатаной арматурной стали.

Арматуру класса А-II изготавливают по ГОСТ 5781 – 82 из спокойной углеродистой стали ВСт5сп2 и ВСт5пс2 (№ 10 – 40) и из низколегированной стали 18Г2С (№ 40 – 80), она обеспечивает требуемые прочностные показатели, хорошо сваривается и не склонна к хрупкому разрушению.

Для железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях низких отрицательных температур при воздействии динамических нагрузок, а также

рассчитанных на выносливость, разработана специальная низколегированная сталь 10ГТ.

Арматура класса А-I II производится из низколегированных сталей 35ГС, 25Г2С, 32Г2Сп.

Арматурные профили класса А-IV изготавливают из высокопрочных низколегированных сталей 20ХГ2С и 80С. Необходимо отметить, что арматура из стали 80С при относительно дорогой технологии получения  $i-r'$  имеет ограниченную свариваемость, а профили из стали 20ХГ2 лишены этого недостатка, но имеют более высокую себестоимость. Для производства арматуры класса А-V используют низколегированную сталь 23Х2ГТ, подвергнутую низколегированному отпуску (нагрев до  $250 \pm 50^\circ\text{C}$ ). Это самая высокопрочная из свариваемых арматурных сталей.

Профили класса А-VI изготавливаются из сталей 22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2СР и 20Х2Г2СР.

Термическое упрочнение углеродистых и низкоуглеродистых сталей является эффективным способом повышения их прочностных характеристик. Для этого используют высокотемпературную термомеханическую обработку, при которой профиль после прокатки в чистовой клетке подвергается интенсивной закалке с последующим самоотпуском. При этом повышение прочностных свойств достигается путем направленного ориентирования мартенситной фазы и ее измельчения, вызванного направленным фазовым наклепом. Степень упрочнения зависит от скорости перемещения стержня и интенсивности охлаждения.

В зависимости от характера сцепления арматуры с бетоном конструкция периодического профиля может иметь различную конфигурацию и размеры

отдельных элементов. Периодический профиль образован системой ребер на его поверхности.

Продольные ребра, идущие вдоль оси стержня, могут иметь переменную или постоянную высоту и ширину, быть сплошными или прерывистыми. Применяют также отдельно стоящие ребра различной конфигурации, ориентированные под разными углами на поверхности стержня. Наклонные выступы расположены по одно- или многозаходной винтовой линии переменной или постоянной высоты и ширины, ориентированы под различными углами к оси стержня и бывают сплошными или прерывистыми[1].

Существуют три основные формы стержня профиля – круг, овал и квадрат. Каждая из приведенных форм имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам профилей с круглой формой сердечника относится симметричность, обеспечивающая хорошие условия переработки, сварку, подготовку концов для предварительного натяжения, стыковку и т.д., а также возможность прокатки в двухвалковых клетях и взаимозаменяемость валков. Недостатком этих профилей является малая площадь поверхности, снижающая сцепление арматуры с бетоном, ограниченная площадь закаленного сечения при термоупрочнении, небольшой коэффициент вытяжки чистового калибра.

Преимуществом профилей с овальной формой поперечного сечения является более развитая поверхность, способствующая эффективному термоупрочнению, и стабильность положения полосы в калибре при прокатке. Недостатком профилей овальной формы следует считать увеличенные по сравнению с круглыми профилями габаритные размеры и трудоемкость переработки.

Преимуществом квадратных профилей является высокая технологичность при прокатке, которая заключается в возможности применения симметричных двухвалковых калибров с высоким коэффициентом вытяжки, обеспечивающим хорошее заполнение, малый износ инструмента и устойчивость профиля в калибре. Эксплуатационные характеристики и технологичность их переработки практически не отличаются от аналогичных параметров для профилей круглой формы. Существенное влияние на технологию производства и эксплуатационные параметры оказывают ребра или выступы на поверхности стержня. Наклонные выступы в зависимости от конструкции профиля имеют ориентацию к продольной оси от 30 до 90°[1,2].

Требования к высоте наклонного выступа носят альтернативный характер, так как сцепление арматуры с бетоном требует увеличения высоты выступа, а повышение усталостной прочности профиля – его уменьшения. По условиям технологии прокатного производства затруднительно получение выступов высотой более 3,5 мм из-за опережения. Ширина наклонных выступов оказывает меньшее влияние на технологию производства арматуры и ее эксплуатационные свойства.

Важной характеристикой профиля является шаг наклонных выступов, который влияет на параметры сцепления и прокатки. На условия деформации при прокатке арматурных профилей шаг профиля не оказывает заметного влияния, однако при изготовлении инструмента (прокатных валков) уменьшение шага профиля снижает производительность процесса нарезки канавок для формирования выступов, так как канавки наиболее подвергнуты износу и являются причиной выхода валков из строя.

Продольные ребра по форме и размерам мало отличаются от наклонных. Их формирование в процессе прокатки не представляет существенных трудностей и в основном обусловлено переполнением калибра из-за большого

уширения при прокатке, вызванного применением больших обжатий для получения наклонных выступов. Мало заметное влияние они оказывают и на эксплуатационные свойства арматуры. По некоторым стандартам, например, Великобритании, продольные ребра на профилях вообще отсутствуют, а иногда выполняют пересечение наклонных выступов, а также наклонных и продольных ребер, что при улучшении сцепляемости профиля приводит к снижению его усталостной прочности и долговечности. Это вызвано концентрациями напряжений в местах пересечения выступов при циклической нагрузке.

Разграничение арматуры по классам по уровню механических свойств требует отличий в конструкции профиля, либо его внешнем виде для удобства использования. В связи с этим применяется соответствующая маркировка профиля в виде специфических элементов на его поверхности, либо соответствующей окраски. Характерным примером такой маркировки является наличие профилей типа "елочка", и "спираль" (ГОСТ 5781–82). Профилем типа "елочка" маркируется арматура классов А-III и А-VI, а профилем типа "спираль" – арматура класса А-II. Преимуществом такой маркировки является использование для прокатки одинаковых по конструкции валков[1].

### 1.3 Влияние режима нагрева на механические свойства арматурной стали.

Арматурные профили производят в основном из сталей II группы и лишь в отдельных случаях арматуру классов А–IV и А–V из сталей III группы или легированных. Режимы нагрева металла при производстве арматурных профилей, как правило, почти не отличаются от режимов нагрева при прокатке остального сортамента (таблица 1).

Таблица 1 – Температура нагрева заготовки перед прокаткой

| Группа сталей | Марка сталей                              | Температура, °С |
|---------------|---|-----------------|
| I             | Ст4, 10кп, 10пс, 20кп, 08                 | 1160 – 1180     |
| II            | Ст5, Ст6, 40, 45, 50, 55, 35ГС            | 1140 – 1160     |
| III           | 60, 65, 70, 75                            | 1120 – 1140     |
| Легированные  | 12X18H9, 12X18H10T,<br>36X18H25C2, 40X9C2 | 1180 – 1200     |

Основная цель нагрева металла перед прокаткой – повышение его пластических свойств и снижение сопротивления деформации.

При горячей прокатке температура нагрева металла оказывает существенное влияние не только на пластические, но и на прочностные свойства готовых профилей. При прокатке арматурных профилей № 22 и 25 из стали Ст5, увеличение температуры заготовки с 1120°С до 1270°С приводит к снижению предела прочности от 546 до 490 МПа, а предела текучести от 332 до 305 МПа. Ударная вязкость при этом уменьшается в два раза, относительное удлинение на 6 %, а относительное сужение на 25%. Нагрев



стали до температуры 1210°C приводит к снижению прочностных свойств за допустимые пределы[5].

Металлографические исследования показывают, что на конечную структуру прокатанного металла и его физико-механические свойства, кроме температуры нагрева и прокатки, оказывает влияние интенсивность деформации и общая вытяжка.

Структура нагретых заготовок состоит из перлита с ферритом (зерно 1–2 балла). При нагреве выше 1210°C и его продолжительности более 90 мин наблюдается видманштеттова структура. В процессе деформации структура становится мелкозернистой (зерно 4–8 балла).

Режим нагрева металла подбирается в зависимости от физико-механических свойств стали и условий теплопередачи в печи.

Стали с низким содержанием углерода могут нагреваться с любой скоростью.

Для сталей II группы существенной является первая фаза нагрева – до температуры начала фазовых превращений в металле. Начальный период нагрева характеризуется значительной разницей температур поверхностных и внутренних слоев металла, приводящей к появлению в металле температурных напряжений. В дальнейшем по мере нагрева до температур, при которых начинаются структурные превращения в металле, возникают структурные напряжения, обусловленные разностью температур в различных слоях. При большой разнице температур различных слоев металла температурные и структурные напряжения могут достичь критической величины.

Первая фаза нагрева должна обеспечивать минимальные температурные и структурные напряжения, не влияющие на качество металла.

Последующая стадия нагрева является менее опасной, так как по мере повышения температуры всех слоев выше температуры фазовых превращений критические напряжения не возникают. Далее нагрев ведется с максимально возможной скоростью для сокращения времени нахождения металла в зоне высоких температур из-за опасности интенсивного окалинообразования и обезуглероживания поверхностных слоев.

Для обеспечения высокой пластичности металла процесс прокатки следует вести при максимально возможной температуре, а оптимальные физико-механические свойства металла обеспечиваются обработкой его при более низких температурах. Противоречивость этих требований обычно устраняется применением ускоренного охлаждения. Это позволяет осуществлять прокатку в зоне температур, обеспечивающих максимальную пластичность, а после выхода металла из чистовой клетки уменьшать его температуру, предотвращая рост аустенитного зерна и снижение механических характеристик. При производстве арматурной стали, особенно упрочненной, важно не допускать больших колебаний температуры нагрева заготовок.

Стабильный нагрев без существенных отклонений позволяет уменьшить разброс свойств стали, стабилизировать процесс упрочнения и повысить качество продукции[1].

## 1.4 Прокатка арматурной стали на непрерывных станах

Как было указано выше, периодические арматурные профили прокатывают на проволочных, мелко – , средне – и крупносортовых станах.

При этом сортамент арматурных профилей разделяется следующим образом: № 6 – 10 прокатывают на проволочных станах, № 10 – 32 на мелкосортных станах, № 20 – 50 на среднесортных, № 50 и выше на крупносортовых станах. Значительный объем производства арматурных профилей еще составляет продукция станов линейного типа, которые являются типичными для старых прокатных цехов с небольшим объемом производства. Более современные станы этого типа после модернизации имеют в своем составе непрерывные группы клетей. Типовыми станами современных прокатных цехов являются непрерывные и полунепрерывные, которые производят основной объем арматурных профилей. Они широко механизированы и автоматизированы.

Непрерывные станы являются современным типом прокатных станов, отличающихся высокой скоростью прокатки, практически полной механизацией и автоматизацией технологических операций. На непрерывных мелкосортных станах получают периодические арматурные профили от № 10 до № 32. Особенностью непрерывных станов является высокая температура конца прокатки (1000 – 1050°С). Это обстоятельство вызывает необходимость применения ускоренного охлаждения и термоупрочнения арматурных профилей, что позволяет значительно улучшить структуру и механические свойства проката, уменьшить потери на окалинообразование[1].

Непрерывный мелкосортный стан состоит из четырех групп клетей: черновой, промежуточной и двух чистовых. Черновая группа состоит из семи рабочих клетей с горизонтальными валками. Прокатка в черновой группе

производится в две нитки. Промежуточная группа состоит из четырех горизонтальных клетей. В составе каждой из групп по шесть рабочих клетей с чередующимися вертикально и горизонтально расположенными валками. В чистовой группе клетей прокатка ведется в одну нитку. Для нагрева заготовок 80 X 80 мм имеются две методические печи с монолитным наклонным подом, отапливаемые природным газом. Нагретая до температуры 1180 – 1200°С заготовка по рольгангу транспортируется к стану. Температура начала прокатки для арматурных сталей 1140 – 1160°С. После прокатки в черновых клетях производится обрезка переднего конца раската летучими ножницами и раскат направляется в промежуточную группу клетей. При прокатке арматурных профилей № 14 – 28 используются только две первые клетки промежуточной группы, после прокатки, в которых раскат по желобу направляется в одну из чистовых групп. В зависимости от номера прокатываемого арматурного профиля в соответствии с применяемой схемой калибровки используется 2, 4 или 6 клетей чистовой группы. За чистовой группой установлены летучие двухбарабанные ножницы, которые делят раскат на части в соответствии с длиной холодильника. Холодильник речный, двусторонний, длиной 125 м. Перед поступлением на холодильник раскат проходит через установку термоупрочнения длиной 12 м, в которой охлаждается водой под давлением 1,0 – 1,2 МПа до температуры 650 – 700°С. Скорость прокатки на стане достигает 18 м/с. Производительность при прокатке профилей № 14 – 28 составляет 130 – 190 т/ч. Профили № 8 и 10 получают на непрерывном проволочном стане 250. При производстве арматурных профилей возможно появление различных дефектов на прокатаной полосе. Дефекты поверхности профиля (резки, рябизна, плены, закаты, вмятины, отпечатки и др.) связаны с состоянием поверхности калибров и валковой арматуры, налипанием металла на валки и арматуру, а также переполнением отдельных калибров. По мере работы происходит износ чистового калибра, в связи с чем диаметр стержня профиля постоянно

увеличивается и может выйти за пределы плюсового допуска. Для прокатки в минусовом поле допуска уменьшают зазор между валками. Стойкость калибра зависит от твердости валков и обычно составляет 200 – 300 т, в отдельных случаях до 500 т проката. После выработки калибра выполняется переход на новый калибр или перевалка валков. На профиле возможно появление дефекта в виде невыполнения отдельных наклонных выступов, что может быть связано с забиванием канавок на валке или дефектами поверхности заготовки (плены). Неполное выполнение' продольных и поперечных ребер связано с недостаточным обжатием в чистой клетке из-за уменьшения размеров предчистового овала. На непрерывных станах невыполнение ребер на профиле может быть связано с чрезмерным натяжением раската в межклетьевом промежутке. Некоторые дефекты арматурного профиля могут быть связаны с недостатками применяемой, системы калибровки. Например, предчистовой овал с острыми кромками может вызвать образование продольного выступа на полосе по вертикальному диаметру профиля[1,2].

Контроль качества поверхности и геометрических размеров производится путем отбора проб, проверки размеров шаблонами и визуального осмотра профиля. Допускаемые отклонения размеров элементов профиля нормируются требованиями ГОСТ 5781 – 82. При этом относительное I смещение винтовых выступов по сторонам стержня, разделяемых продольными ребрами, не нормируются. Овальность стержней (разность между наибольшим и наименьшим диаметрами в одном сечении) не должна превышать поля допуска на диаметр (сумму плюсового и минусового отклонений). Кривизна прутков не должна превышать 0,6 % измеряемой длины. На поверхности стержней, включая поверхность ребер, не должно быть трещин, раковин, плен, закатов. Допускаются отдельные местные повреждения ребер (не более 3 на один метр длины стержня), а

также незначительная ржавчина, вмятины, наплывы, рябизна, отдельные волосовины и шероховатость в пределах допускаемых отклонений по ГОСТ[1].

## 1.5 Постановка цели и задач исследования

Производство арматурного проката происходит по схеме кислородно-конвекторный цех (ККЦ) → машина непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) (кв. 100 мм.) → прокатный цех (ПЦ) → сдаточный контроль → переправка заготовки потребителю.

Целью исследования было освоение арматурного проката с использованием бора, вместо ванадия, как легирующего элемента с целью увеличить механические свойства арматуры.

Была проведена одна опытная плавка, в которой ванадий полностью был заменён бором, для удешевления готовой продукции.

Поскольку в процессе производства четырех опытных партий арматуры размером 10, 12, 25 и 28 мм (из опытной плавки) при сдаточном контроле установлено несоответствие готовых изделий требованиям ГОСТа 34028-16 по ряду нормируемых показателей. В связи с этим, было принято решение о проведении контрольных исследований изделий по всем нормируемым показателям на соответствие нормам.

Задача исследования:

- провести анализ химического состава металла каждой партии;
- провести анализ состава и количества неметаллических включений;
- провести исследование микроструктуры металла;
- провести повторные механические испытания.

## 2. МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

### 2.1. Проблемы выбора марки арматурной стали

Новый ГОСТ 34028-2016 ограничивает химический состав марок сталей и по нему нельзя использовать марки стали подходящие под старый ГОСТ 5781-1982 (25Г2С, 35ГС). Поэтому химический состав выбирали в соответствие с новым ГОСТом (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав для класса проката А400 по ГОСТу 34028-2016

| Класс текучести | Массовая доля элементов, %, не более |      |      |       |       |       |      |      |      |
|-----------------|--------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
|                 | C                                    | Si   | Mn   | P     | S     | N     | Cu   | Cr   | Ni   |
| A400            | 0,22                                 | 0,90 | 1,60 | 0,050 | 0,050 | 0,012 | 0,35 | 0,30 | 0,30 |

В процессе выплавки стали нужно обязательно контролировать в химическом составе алюминий (до 0,006), чтоб его при разливке стали не «затянуло» в сталеразливочный стакан МНЛЗ. Образование корочки  $Al_2O_3$ , которая образует плёнку имеющую температуру плавления выше, чем железа, затрудняет разливку стали. Суженные пределы химического состава для класса текучести А400С в зависимости от профиля арматуры показаны в таблице 2.

Расшифровка стали и влияние легирующих элементов:

А400С – буква А в маркировке говорит о том, что металлическое изделие является горячекатаным арматурным прокатом. Цифра 400 указывает на предел текучести –  $400 \text{ Н/мм}^2$



Кремний – вводят в сталь для раскисления, содержание кремния как примеси не превышает 0,37%. При повышении содержания кремния выше 0,37% значительно улучшаются упругие свойства, магнитопроницаемость, сопротивление коррозии и стойкость против окисления при высоких температурах.

Марганец – как и кремний вводится для раскисления стали, так же марганец связывает серу в соединение MnS препятствуя образованию легкоплавкого соединения FeS. Большое содержание серы в сталях может привести к красноломкости при горячей обработке сталей давлением. Однако марганец образует с железом твёрдый раствор и увеличивает твёрдость, износостойчивость, стойкость против ударных нагрузок, не уменьшая пластичности.

Подобранный материал для удовлетворения свойств арматура класса А400С в соответствии с химическим составом для профилей № 10-18 является сталь 20, а для профилей №20-28 приблизительно сталь 17ГС (таблица 3).

Таблица 3 – Суженные пределы химического состава для класса текучести А400С в зависимости от профиля арматуры

| Номер профиля | Массовая доля элементов, % не более |               |               |       |       |       |      |      |      |       |
|---------------|-------------------------------------|---------------|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
|               | C                                   | Si            | Mn            | P     | S     | N     | Cu   | Cr   | Ni   | Al    |
| №10-18        | 0,17-<br>0,22                       | 0,15-<br>0,25 | 0,50-<br>0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,012 | 0,35 | 0,30 | 0,30 | 0,006 |
| №20-28        | 0,18-<br>0,22                       | 0,20-<br>0,30 | 1,05-<br>1,20 | 0,030 | 0,020 | 0,012 | 0,35 | 0,30 | 0,30 | 0,006 |

## 2.2. Испытательное оборудование

Испытание арматурного проката различных классов проводится на разрывной машине Р-50 (рисунок 1), которая предназначена для статистических испытаний на растяжение образцов металлов и сплавов, а также их изделий.

При применении дополнительных приспособлений могут проводиться испытания на загиб (изгиб  $180^\circ$ ).

Машина может работать при температуре  $25 \pm 10^\circ\text{C}$  и относительной влажности от 40 до 80%.

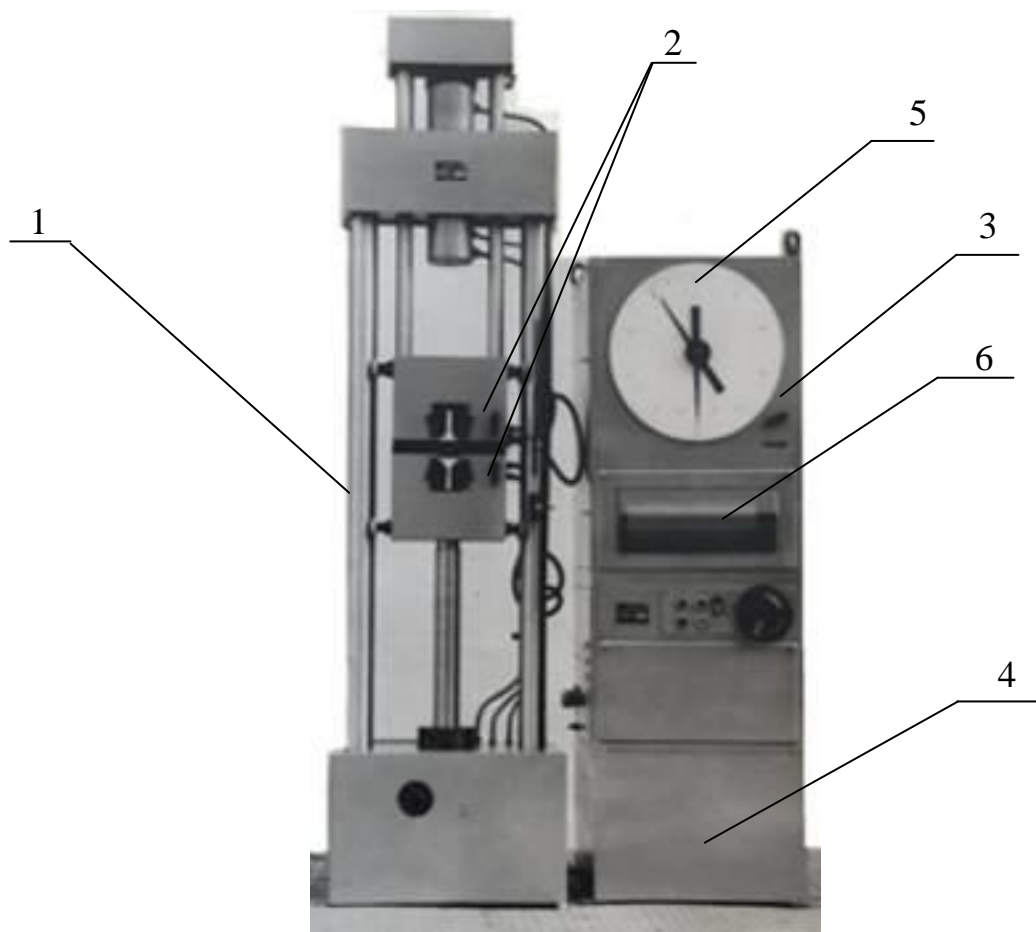


Рисунок 1 – Испытательная машина Р-50  
Устройство машины

Машина представляет собой установку, состоящую из нагружающего устройства 1, захватов 2 и пульта управления 3. Нагружающее устройство

предназначено для деформирования и разрушения испытываемого образца. Пульт управления служит для управления процессом нагружения образца и контроля за величинами нагрузок и деформации. Пульт управления включает насосную установку 4 с системой управления, силоизмеритель 5 и диаграммный аппарат 6 для записи диаграммы «нагрузка деформации». Технические характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные технические характеристики разрывной машины Р-50

| Модификация   | Р-50   |
|---|--|
| Наибольшая создаваемая нагрузка, кН                             | 500  |
| Тип привода   | Гидравлический                                       |
| Диапазон измерения, кН  | 2-100<br>50-250<br>100-500                           |
| Рабочий ход активного захвата, мм                               | 320  |
| Высота рабочего пространства, включая ход активного захвата, мм | 1000   |
| Расстояние от оси образца до колонны, мм                        | 300  |
| Погрешность при нагружении, %                                   | ±1   |
| Максимальная скорость перемещения активного захвата, мм/мин     | 100  |
| Отображение данных испытаний                                    | Аналоговый циферблат, самописец<br>ленточный         |
| Диаметры цилиндрических образцов                                | 8-36   |
| Диаметр плит сжатия   | 180  |
| Габаритные размеры, (ДхШхВ), мм<br>не более                     | 1800х1000х3870<br>(без учета хода активного захвата) |
| Масса испытательной машины, кг,<br>не более                     | 3000   |
| Мощность, кВт   | 3,5  |

### 2.3. Методика испытания

Испытания на растяжение проводится по ГОСТу 12004-81 с некоторыми изменениями в соответствии с ГОСТом 34028-16. Измеряемыми величинами являются:  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_5$ ,  $\delta_{max}$ .

1. Величину относительного удлинения  $\delta$ , %, вычисляют по формуле:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где  $l_k$  – конечная длина образца;

$l_0$  – начальная длина образца.

В зависимости от величины расчетной длины образца к букве добавляют индекс. При начальной расчетной длине равной  $5d - \delta_5$ .

2. Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке  $\delta_{max}$  может быть определено по формуле:

$$\delta_{max} = \delta_p + \frac{\sigma_B}{E_H} \cdot 100,$$

где  $\delta_p$  – равномерное удлинение;

$\sigma_B$  – временное сопротивление;

$E_H$  – модуль упругости,  $2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ .

Величину относительного равномерного удлинения  $\delta_p$ , %, вычисляют по формуле:

$$\delta_p = \frac{l_H - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где  $l_0$  – начальная длина образца;

$l_n$  – конечная расчётная длина, не включающая место разрыва.

3. Временное сопротивление вычисляют по формуле:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0},$$

где  $P_{max}$  – максимальная нагрузка действующая на образец;

$F_0$  – площадь поперечного сечения.

4. Предел текучести вычисляют из соотношения:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0},$$

где  $P_T$  – наименьшая нагрузка на образец.

Испытания на изгиб с разгибом проводят по методике описанной в ГОСТе 34028-16, так же изгиб с разгибом можно заменить на изгиб ГОСТ 14019-03.

Испытание на изгиб с последующим разгибом заключается:

– в пластической деформации образца проката путём изгиба до достижения заданного угла –  $90^\circ$ ;

– в старении после пластической деформации по режиму: нагрев испытуемого образца до температуры  $(100 \pm 10)^\circ\text{C}$ , выдержка при данной температуре не менее 60 минут, охлаждение на спокойном воздухе при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;

– в разгибе (обратном изгибе) после старения под действием силы в направлении, противоположном первоначальному, до угла  $20^\circ$ .

Испытания на изгиб выполняются с меньшими затратами (времени, энергии,...) и проводятся в состоянии поставки с загибом образца на 180°.

С учетом нового ГОСТа поменялась методика испытаний:

1. Начальная площадь поперечного сечения табличное значение и находится в ГОСТ 34028-16, а по старому методу в ГОСТе 12004-81 начальная площадь поперечного сечения образцов арматуры вычислялась по формуле:

$$F_0 = \frac{m}{\rho \cdot l},$$

где  $m$  – масса испытуемого образца, кг;

$l$  – длина испытуемого образца, м;

$\rho$  – плотность стали, 7850 кг/м<sup>3</sup>.

Из-за изменения расчета начальной площади поперечного сечения различие в величинах предела прочности и предела текучести снижено на 20-35 Н/мм<sup>2</sup>.

2. Модуль упругости  $E_n$  определенная величина в ГОСТе 34028-16 она равна  $2 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>, а в предыдущей методике  $E_n$  рассчитывалось.

Модуль упругости  $E_n$  это отношение приращения напряжения к соответствующему приращению упругой деформации на начальном этапе нагружения и определяется по формуле:

$$E_n = \frac{(P_{0.35} - P_{0.10}) \cdot l_0}{(\Delta l_{0.35} - \Delta l_{0.10}) \cdot F_0},$$

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца для испытания.

При этом в интервале от 0,1 до 0,35  $P_{max}$  должно быть не менее трех последовательных этапов нагружения.

Все испытания должны соответствовать нормам механических свойств проката указанных в таблице 5.

Таблица 5 – Механические свойства арматурного проката соответствующие ГОСТу 34028-2016

| Класс проката | Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup> | Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup> | Относительное удлинение, % |                |
|---------------|-------------------------------------|--|----------------------------|----------------|
|               |                                     |  | $\delta_5$                 | $\delta_{max}$ |
|               | не менее                            |  |                            |                |
| A400C         | 390                                 | 590  | 16,0                       | 5,0            |

Для испытаний механических свойств количество проб указано в таблице 6.

Таблица 6 – Количество проб для контроля качества механических свойств

| Контролируемые показатели качества | Пробы                   |  | Образца      |             |
|------------------------------------|-------------------------|--|--------------|-------------|
|                                    | Кол-во, шт.             | Размеры, мм.                                 | Тип          | Кол-во, шт. |
| Механические свойства              | 1 от каждых 70 т партии | 500мм до №25 вкл.;<br>550-600мм<br>свыше №25 | Растяжение   | 1           |
|                                    | 1 от партии             | 500мм до №25 вкл.;<br>550мм<br>свыше №25     | Изгиб (180°) | 1           |

Прокат принимают партиями. Партия должна состоять из проката одной формы профиля, одного номинального диаметра, одного класса, одной плавки стали, изготовленного одним способом производства. Масса партии должна быть не более объема одной плавки.



### 3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

#### 3.1. Отбор образцов

Из многочисленных профилей арматуры, прокатанной из одной плавки (таблица 7). Красным цветом в таблице выделены образцы, отбракованные по ГОСТам 34028-2016 и 5781-1982 по результатам механических испытаний. Для дальнейшего исследования и определения причин неудовлетворительных значений механических свойств, от профилей диаметром 10 и 25 мм были отобраны по два образца, один из которых имеет удовлетворительный уровень свойств, другой недопустимые значения по пределу текучести. Отобранные образцы выделены в таблице 7 желтым цветом и маркировались как 10-2, 10-3 и 25-2, 25-3.

Таблица 7 – Результаты контроля механических испытаний опытной партии

| Профиль             | Номер партии | Механические свойства   |               |                |                    |
|---------------------|--------------|-------------------------|---------------|----------------|--------------------|
|                     |              | Временное сопротивление | Предел текуч. | Относ.удл.     |                    |
|                     |              |                         |               | не менее       |                    |
|                     |              | Н/мм2                   | Н/мм2         | $\delta_5, \%$ | $\delta_{max}, \%$ |
| По ГОСТу 34028-2016 |              | <b>590</b>              | <b>390</b>    | <b>16</b>      | <b>5</b>           |
| По ГОСТу 5781-82    |              | <b>590</b>              | <b>390</b>    | <b>14</b>      |                    |
| №12                 | 1            | 592                     | 412           | 30,8           | 16,8               |
|                     |              | 696                     | 480           | 27,5           | 14,5               |
|                     | 2            | 693                     | 474           | 29,1           | 14,6               |
|                     |              | 692                     | 475           | 28,3           | 13,6               |
|                     | 3            | 586                     | 388           | 29,1           | 13,3               |
|                     |              | 588                     | 388           | 28,3           | 15,3               |
| №10                 | 1            | 606                     | 388           | 37,4           | 19,3               |
|                     |              | 602                     | 387           | 32,4           | 18,8               |
|                     | 2            | 597                     | 386           | 33,2           | 20,6               |
|                     |              | 599                     | 382           | 34             | 20,3               |
|                     | 3            | 622                     | 406           | 36,2           | 16,3               |
|                     |              | 616                     | 413           | 36             | 14,8               |
| №25                 | 1            | 601                     | 377           | 27,6           | 15,8               |
|                     | 2            | 611                     | 367           | 27,4           | 15,3               |
|                     | 3            | 611                     | 407           | 27,6           | 16,3               |
| №28                 | 1            | 577                     | 357           | 24,6           | 18,3               |
|                     | 2            | 577                     | 365           | 27,8           | 16,5               |
|                     | 3            | 577                     | 349           | 26,4           | 15,8               |

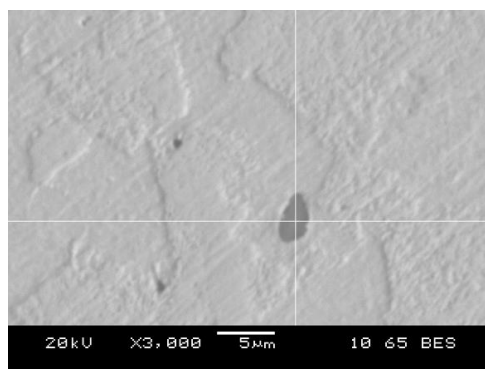
Для отобранных образцов проводилось исследование химического состава готовой продукции, а так же состава неметаллических включений, также металлография и измерения твёрдости.

### 3.2. Исследование химического состава и неметаллических включений

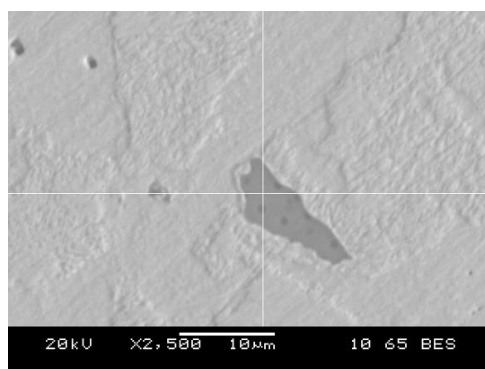
Химический состав исследуемых образцов соответствует ГОСТу 34028-2016 (таблица 8,9).

На растровом электронном микроскопе исследовали химический состав неметаллических включений.

Состав неметаллических включений, характерных для металла образца 25-3 приведен на рис. 2-4.



| Хим. элемент    | O     | Mg   | Al    | Si   | Ca   | Ti   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 25,63 | 8,97 | 30,56 | 4,69 | 2,04 | 0,44 | 9,83 | 17,85 |



| Хим. элемент    | O     | S    | Al   | Si    | Ca   | Ti   | Mn    | Fe   |
|-----------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| Спектр (мас. %) | 28,74 | 0,81 | 2,64 | 21,27 | 0,73 | 0,85 | 39,96 | 5,00 |

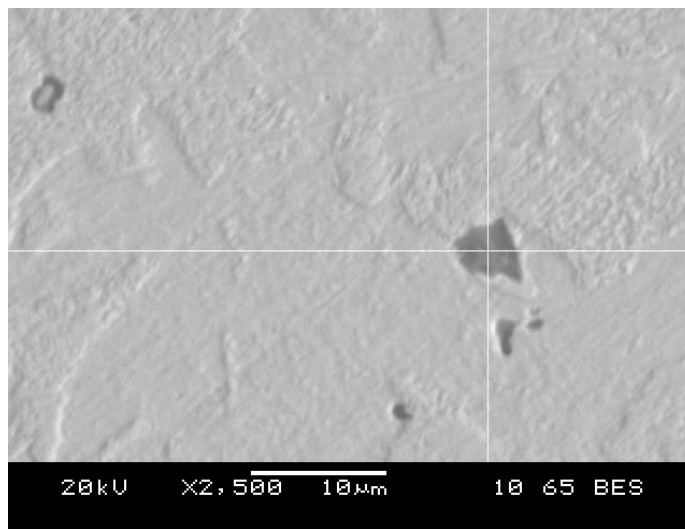
Рисунок 2 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-3.

Таблица 8 – Химические элементы по ГОСТу 34028-16

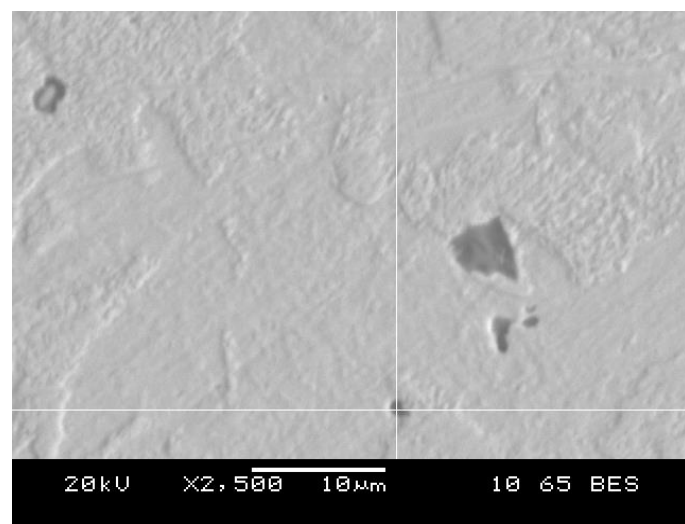
| Образец                        |      | Массовая доля элементов, %, не более |      |      |       |       |       |       |       |       |                |          |       |       |
|--------------------------------|------|--------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------|-------|-------|
|                                |      | C                                    | Si   | Mn   | P     | S     | Ti    | Cu    | As    | Al    | N <sub>2</sub> | V        | Nb    | Mo    |
| Требования<br>ГОСТ<br>34028-16 | А400 | 0,24                                 | 0,95 | 1,7  | 0,055 | 0,055 | 0,025 | 0,35  | -     | 0,025 | 0,013          | 0,1      | 0,1   | 0,1   |
|                                |      |                                      |      |      |       |       |       |       |       |       |                | 0,15 max |       |       |
| 10-2                           |      | 0,213                                | 0,65 | 1,48 | 0,014 | 0,011 | 0,002 | 0,015 | 0,001 | 0,007 | 0,012          | 0,01     | 0,002 | 0,006 |
| 10-3                           |      | 0,22                                 | 0,66 | 1,5  | 0,015 | 0,013 | 0,003 | 0,015 | 0,001 | 0,007 | 0,011          | 0,01     | 0,002 | 0,005 |
| 25-2                           |      | 0,217                                | 0,67 | 1,5  | 0,015 | 0,014 | 0,002 | 0,015 | 0,001 | 0,007 | 0,012          | 0,011    | 0,002 | 0,005 |
| 25-3                           |      | 0,222                                | 0,65 | 1,49 | 0,015 | 0,013 | 0,002 | 0,014 | 0,001 | 0,007 | 0,012          | 0,011    | 0,002 | 0,004 |

Таблица 9 – Химические элементы не входящие в ГОСТ 34028-16

| Образец | Массовая доля элементов, %, не более |       |       |       |        |       |       |       |    |        |        |  |
|---------|--------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----|--------|--------|--|
|         | Cr                                   | Ni    | B     | Co    | Sn     | W     | Zr    | Sb    | Pb | Cd     | Bi     |  |
| 10-2    | 0,082                                | 0,051 | 0,007 | 0,016 | 0,0002 | 0,009 | 0,001 | 0,002 | 0  | 0,0002 | 0,0001 |  |
| 10-3    | 0,082                                | 0,051 | 0,008 | 0,016 | 0,0001 | 0,008 | 0,001 | 0,002 | 0  | 0,0002 | 0,0001 |  |
| 25-2    | 0,084                                | 0,048 | 0,007 | 0,016 | 0,0001 | 0,008 | 0,001 | 0,002 | 0  | 0,0002 | 0,0001 |  |
| 25-3    | 0,082                                | 0,048 | 0,007 | 0,016 | 0,0001 | 0,007 | 0,001 | 0,002 | 0  | 0,0002 | 0,0001 |  |

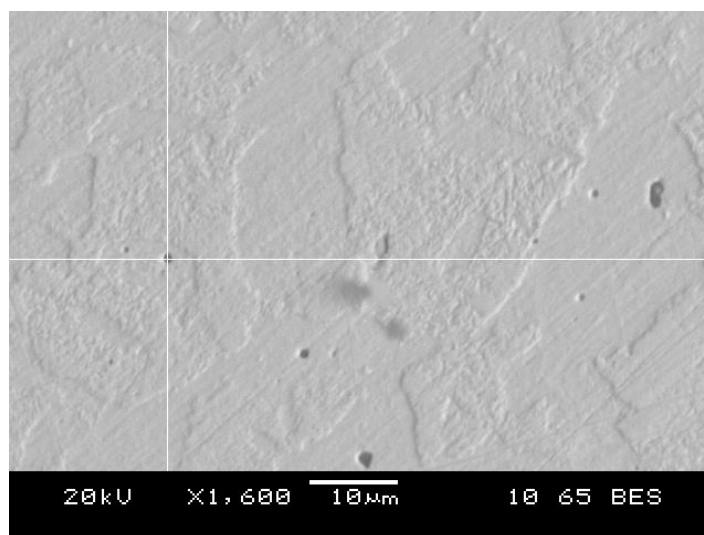


| Хим. элемент    | O     | Al    | Ti   | Fe    |
|-----------------|-------|-------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 28,10 | 57,17 | 0,92 | 13,81 |

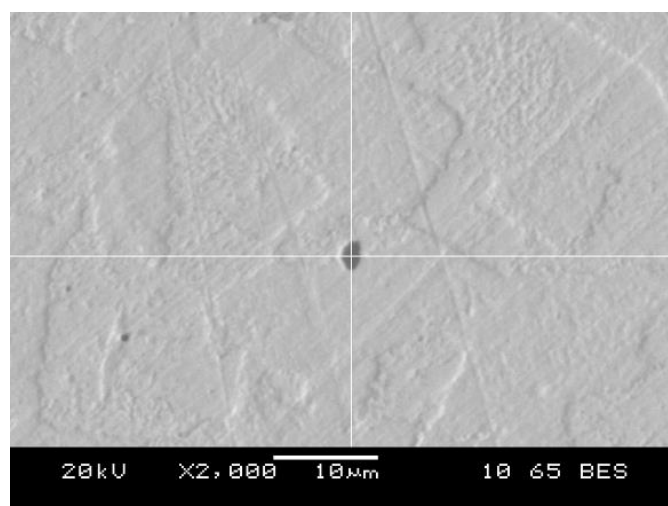


| Хим. элемент    | B     | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 11,49 | 0,31 | 1,88 | 86,31 |

Рисунок 3 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-3



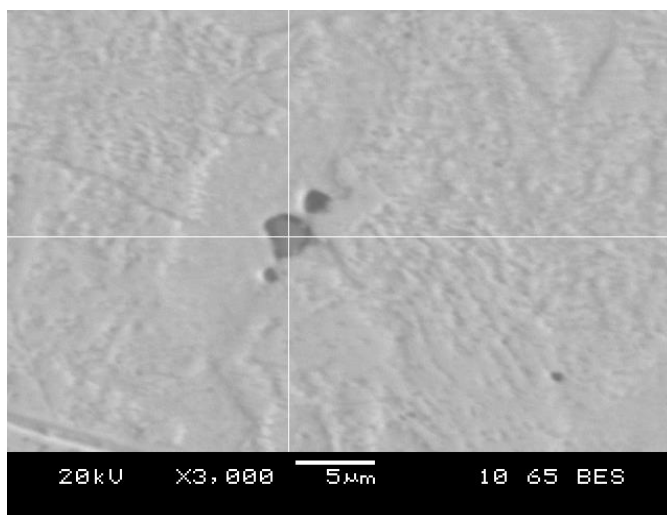
| Хим. элемент    | B    | C    | Mn   | Fe    |
|-----------------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 6,66 | 6,99 | 1,39 | 84,96 |



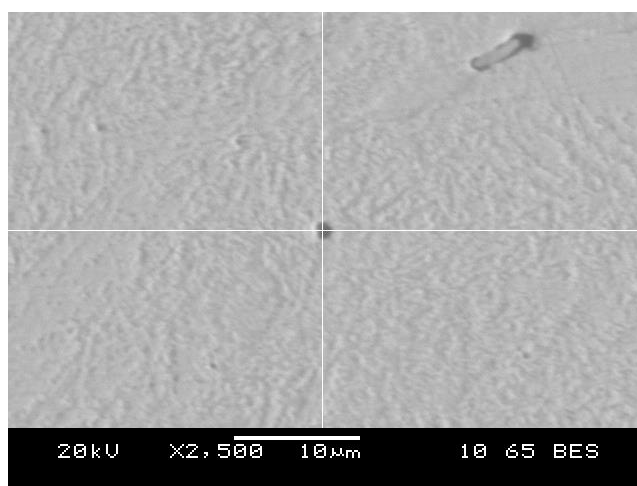
| Хим. элемент    | B     | C     | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|-------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 14,58 | 19,78 | 3,11 | 62,54 |

Рисунок 4 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-3

Характерный вид и состав неметаллических включений на образце 25-2 показан на рис. 5-7.

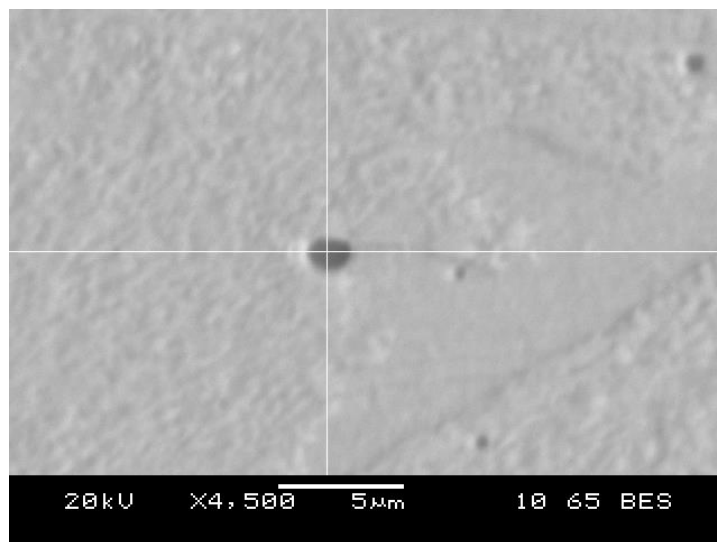


| Хим. элемент    | O     | Mg   | Al    | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|-------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 29,46 | 5,00 | 42,58 | 8,75 | 14,21 |

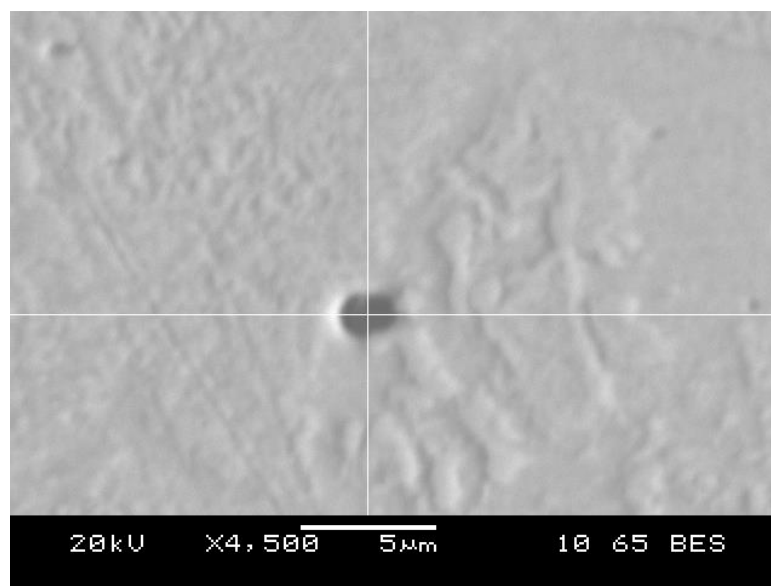


| Хим. элемент    | O    | Mg   | Mn   | Fe    |
|-----------------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 4,99 | 6,02 | 1,30 | 87,69 |

Рисунок 5 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-2



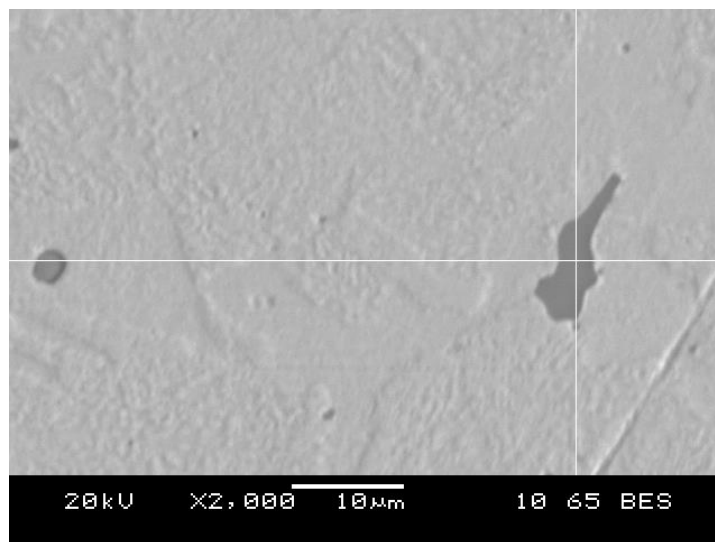
| Хим. элемент    | B     | Al   | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 20,52 | 0,65 | 0,45 | 1,44 | 76,94 |



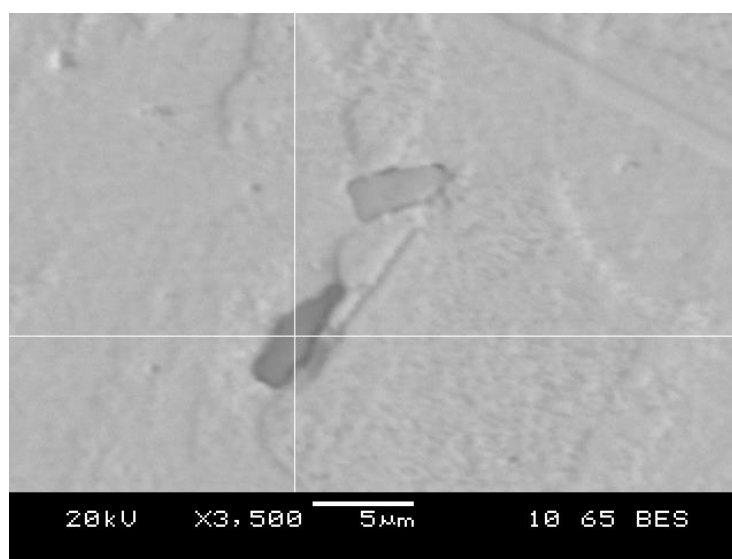
| Хим. элемент    | B    | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 8,29 | 0,49 | 2,11 | 89,11 |

Рисунок 6 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-2





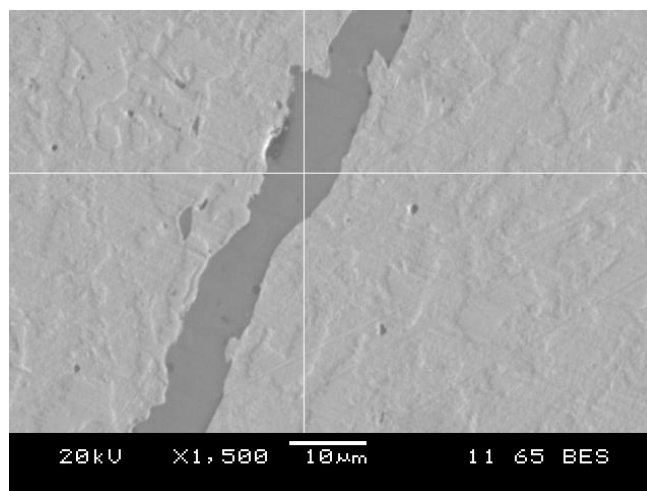
| Хим. элемент    | O     | Mg   | Al    | Si   | Ca   | Ti   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 29,62 | 2,68 | 37,47 | 1,80 | 0,73 | 0,70 | 9,33 | 17,67 |



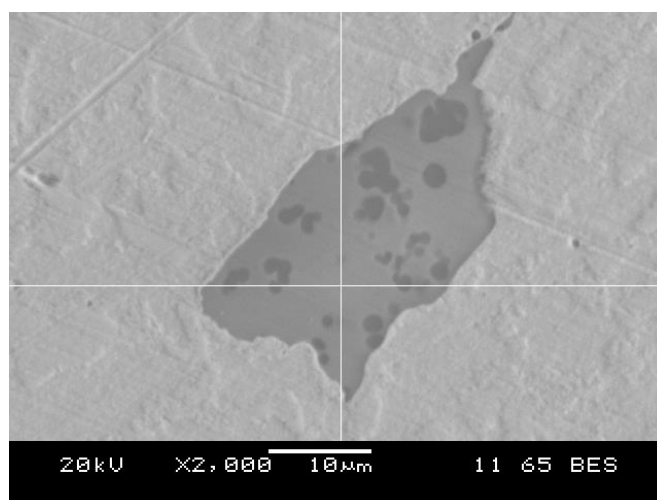
| Хим. элемент    | O     | Mg   | Al    | Si    | Ca    | Ti   | Mn   | Fe   |
|-----------------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Спектр (мас. %) | 40,58 | 4,13 | 16,12 | 17,94 | 11,99 | 0,60 | 6,09 | 2,55 |

Рисунок 7 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 25-2

Состав неметаллических включений, характерных для металла образца 10-3 приведен на рис. 8-10.

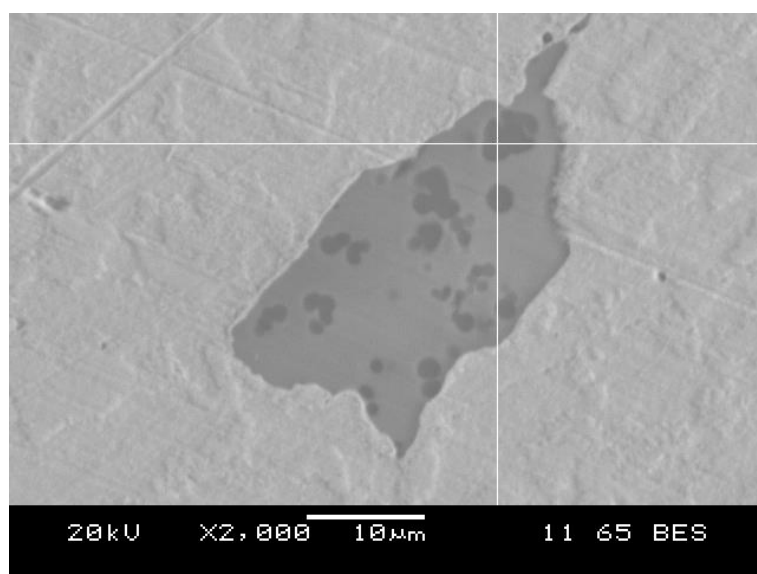


| Хим. элемент    | O     | Al   | Si    | S    | Ca   | Ti   | Mn    | Fe   |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Спектр (мас. %) | 30,64 | 2,41 | 23,86 | 1,75 | 0,37 | 1,02 | 37,31 | 2,64 |

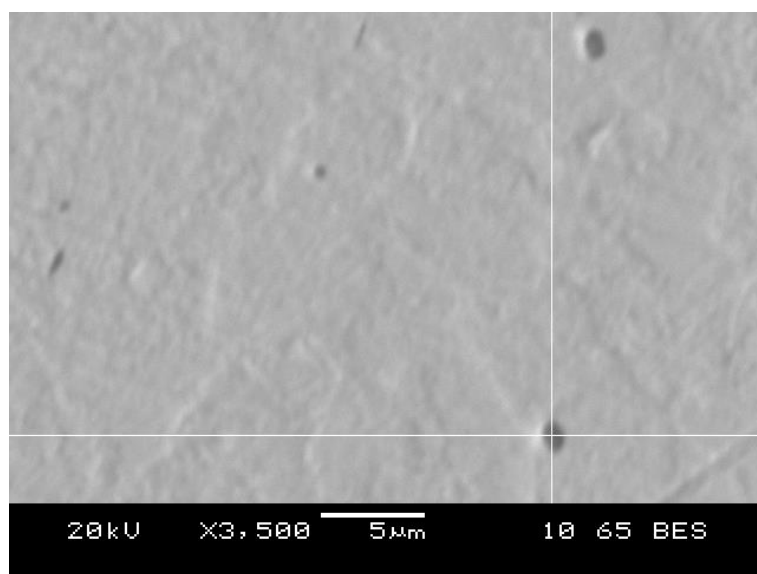


| Хим. элемент    | O     | Al   | Si    | S    | Ti   | Mn    | Fe   |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|-------|------|
| Спектр (мас. %) | 33,28 | 1,62 | 22,64 | 0,39 | 0,91 | 38,75 | 2,41 |

Рисунок 8 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 10-3

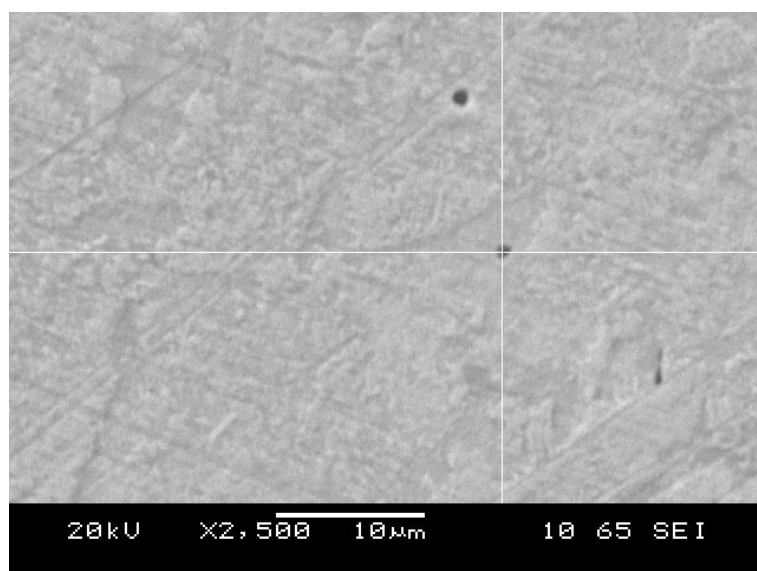


| Хим. элемент    | O     | Al   | Si    | Ti   | Mn    | Fe   |
|-----------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Спектр (мас. %) | 37,36 | 0,53 | 43,08 | 0,42 | 15,88 | 2,72 |

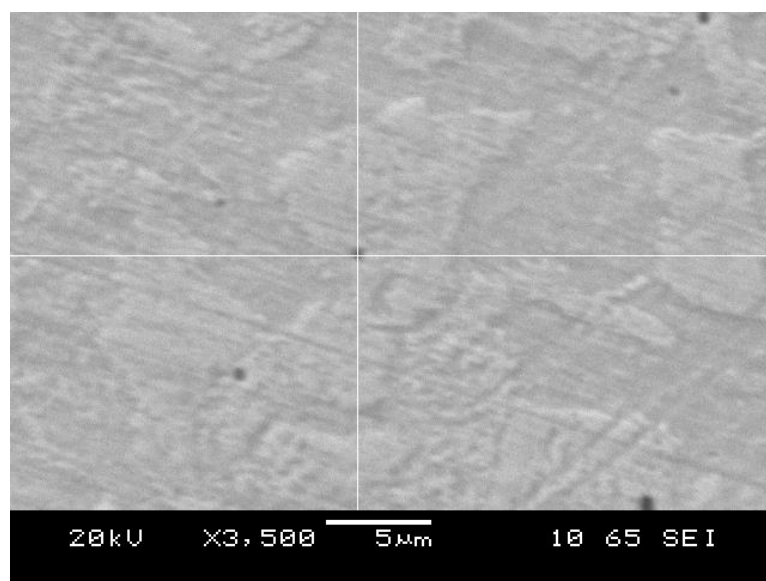


| Хим. элемент    | B     | C     | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|-------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 13,09 | 12,41 | 0,30 | 1,18 | 73,02 |

Рисунок 9 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 10-3



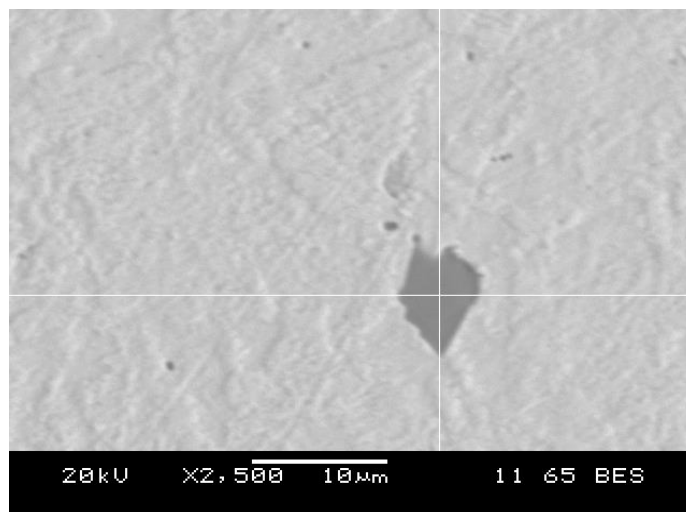
| Хим. элемент    | B     | C     | Al   | Si   | Ca   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 14,51 | 13,27 | 0,93 | 0,65 | 0,31 | 1,18 | 73,02 |



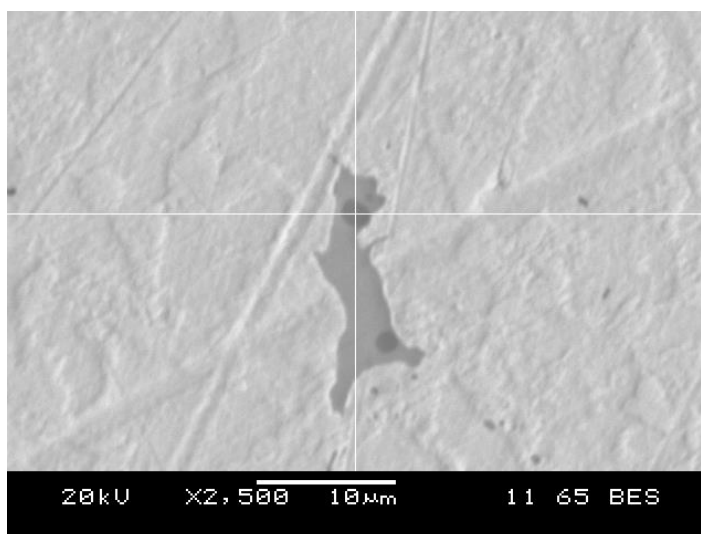
| Хим. элемент    | B    | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 6,96 | 0,40 | 2,11 | 90,53 |

Рисунок 10 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 10-3

Состав неметаллических включений, характерных для металла образца 10-2 приведен на рис. 11-12.

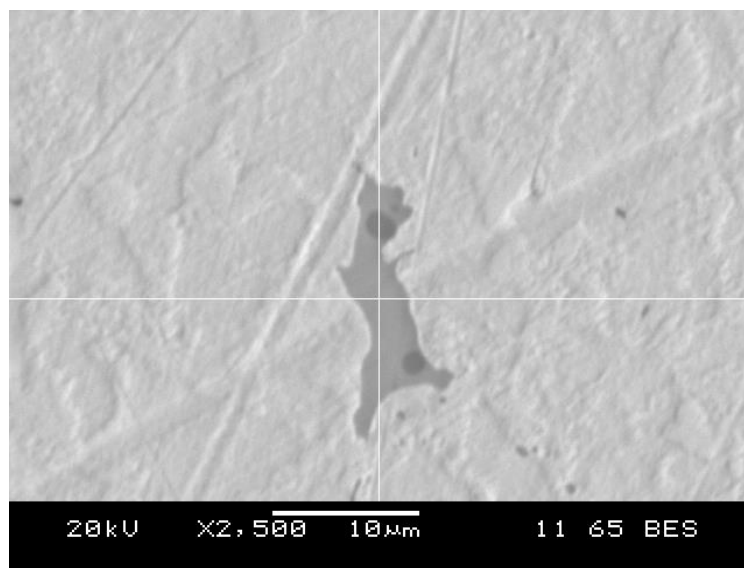


| Хим. элемент | O     | Mg   | Al    | Ti   | ц    | Mn   | Fe   |
|--------------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| Спектр (%)   | 32,29 | 4,47 | 47,46 | 0,46 | 2,63 | 8,77 | 4,02 |

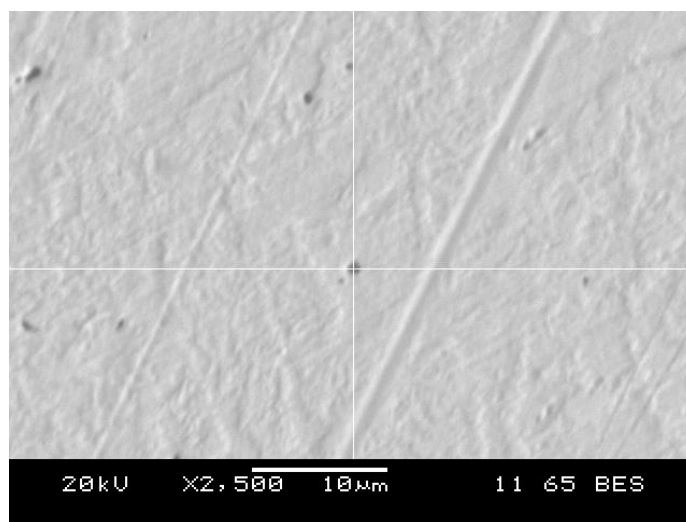


| Хим. элемент | O     | Si    | Ti   | Mn    | Fe    |
|--------------|-------|-------|------|-------|-------|
| Спектр (%)   | 29,93 | 34,16 | 0,46 | 21,63 | 13,82 |

Рисунок 11 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 10-2



| Хим. элемент    | O     | Al   | Si    | S    | Ti   | Mn    | Fe   |
|-----------------|-------|------|-------|------|------|-------|------|
| Спектр (мас. %) | 26,03 | 0,51 | 19,42 | 0,47 | 0,94 | 47,28 | 5,35 |



| Хим. элемент    | B     | Si   | Mn   | Fe    |
|-----------------|-------|------|------|-------|
| Спектр (мас. %) | 12,32 | 0,40 | 0,97 | 86,31 |

Рисунок 12 – Участки анализа и полученные спектры состава неметаллических включений образца 10-2

### 3.3. Металлографический анализ

В ходе металлографического анализа были исследованы образцы до травления и после травления (для травления использовался 4%-ый раствор  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте). Анализ микроструктуры проводился в трёх зонах: осевая зона,  $\frac{1}{2}$  радиуса и у поверхности проката.

#### *Исследования шлифов до травления*

При исследовании нетравленных шлифов на оптическом микроскопе проводилось определение балла неметаллических включений по ГОСТ 1778-70.

Металл образца 25-3 чист по неметаллическим включениям. Согласно ГОСТ 1778-70 кол-во точечных оксидов не превышает 1 балла (рисунок 13). Однако на отдельных полях зрения присутствуют крупные включения сложного состава (рисунок 14).



Рисунок 13 – Неметаллические включения в образце 25-3, x100

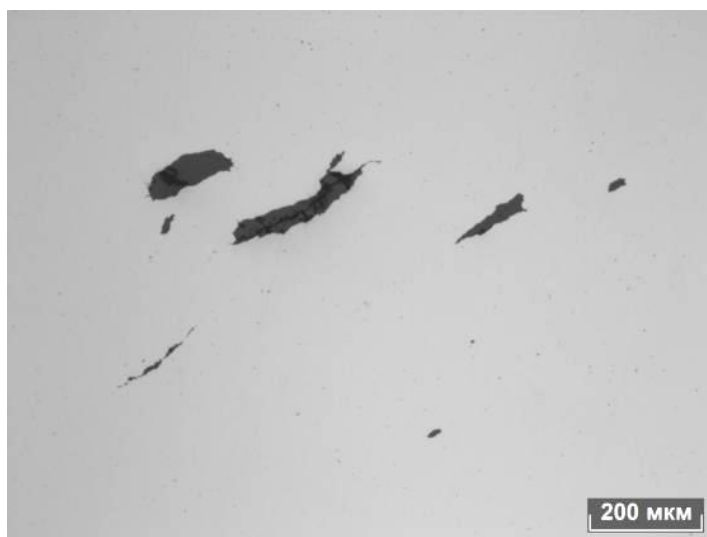


Рисунок 14 – Грубые неметаллические включения в образце 25-3, x100

Металл образца 25-2 чист по неметаллическим включениям. Количество точечных оксидов не превышает 1 балла (рисунок 15). Однако на одном поле зрения присутствуют крупные включения сложного состава (рисунок 16).



Рисунок 15 – Неметаллические включения в образце 25-2, x100





Рисунок 16 – Сложные по составу неметаллические включения в образце 25-2, x100

Металл образца 10-3 чист по неметаллическим включениям. Количество точечных оксидов не превышает 1 балла (рисунок 17). Однако на одном поле зрения присутствуют строчечные оксиды не менее 2 балла (рисунок 18).



Рисунок 17 – Неметаллические включения в образце 10-3, x100

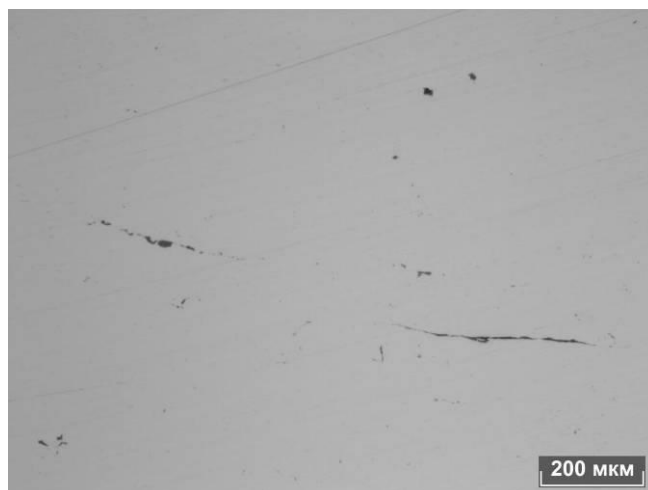


Рисунок 18 – Строчечные оксиды в образце 10-3

Металл образца 10-2 чист по неметаллическим включениям. Количество точечных оксидов не превышает 1 балла (рисунок 19). Однако на одном поле зрения присутствуют строчечные оксиды 2-3 балла (рисунок 20).

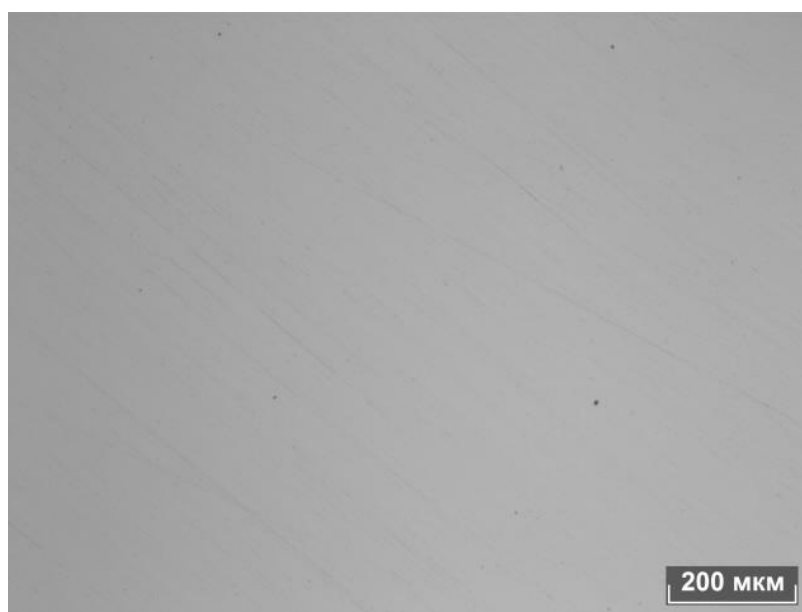


Рисунок 19 – Неметаллические включения в образце 10-2, x100

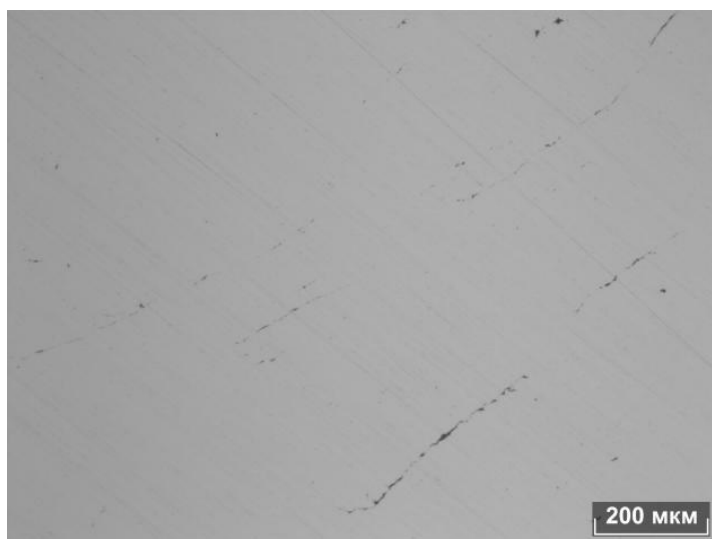
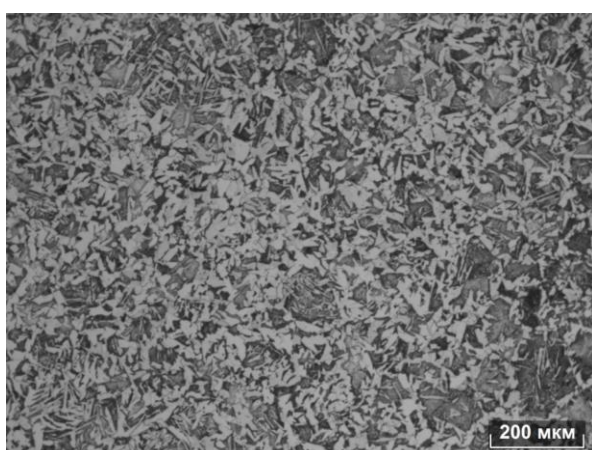


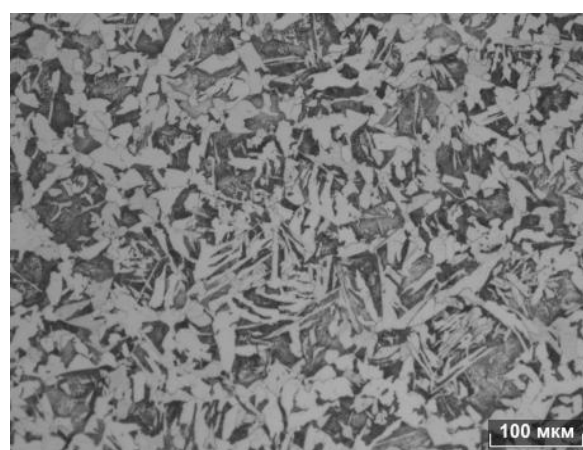
Рисунок 20 – Строчечные оксиды в образце 10-2

*Исследования шлифов после травления*

Образец 25-2 имеет неоднородную ферритно – перлитную структуру. В осевой зоне присутствует структура видманштетт феррита (рисунок 21). Доля феррита составляет 40%. На остальном сечении образца присутствует ферритная сетка. На  $\frac{1}{2}$  радиуса наблюдаются те же структурные составляющие, балл зерна 4, доля феррита снижается до 15% (рисунок 22). У поверхности наблюдается обезуглероженный слой глубиной порядка 60 мкм, размер зерна уменьшается до 5,5 (рисунок 23).

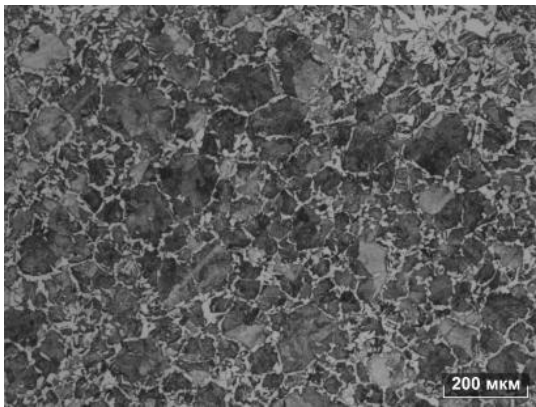


а

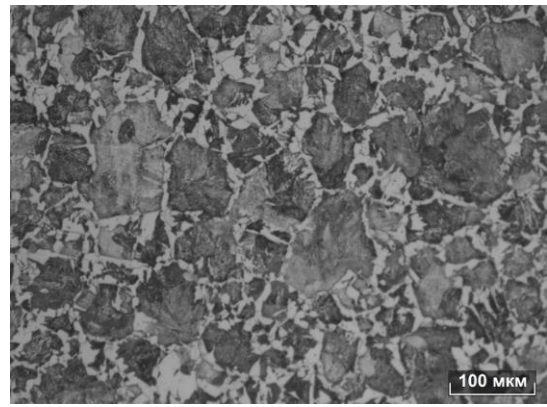


б

Рисунок 21 – Микроструктура осевой зоны образца 25-2: а-х100; б-х200

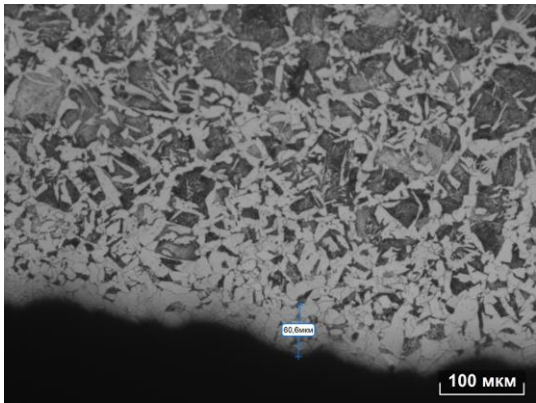


а

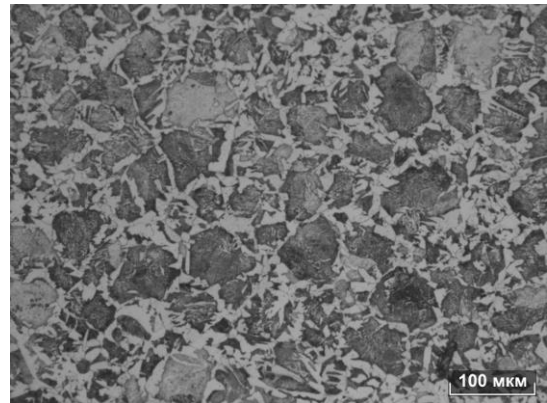


б

Рисунок 22 – Микроструктура  $\frac{1}{2}$  радиуса образца 25-2: а-х100; б-х200



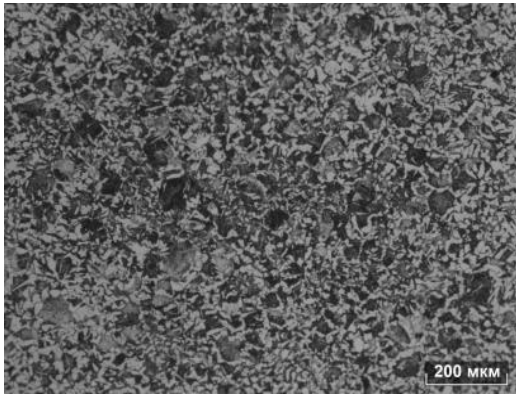
а



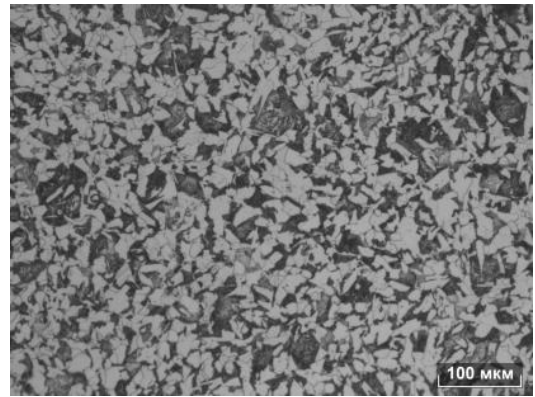
б

Рисунок 23 – Микроструктура у поверхности образца 25-2: а-х100; б-х200

Образец 25-3 имеет однородную феррито – перлитную структуру. У поверхности балл зерна 9 (по ГОСТ 5639), в остальном сечении 8,5. Доля феррита в осевой зоне 60%, на  $\frac{1}{2}$  радиуса и у поверхности 40%. Обезуглероживание поверхности отсутствует. Микроструктура показана на рисунках 24-26.

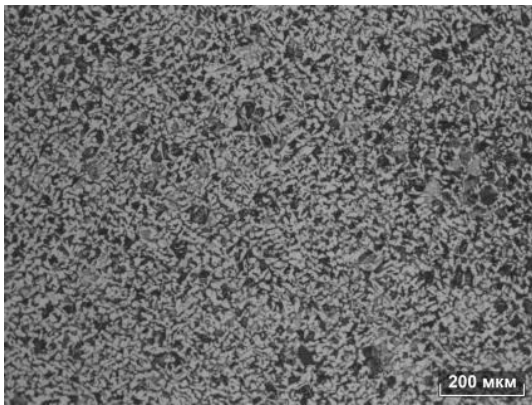


а

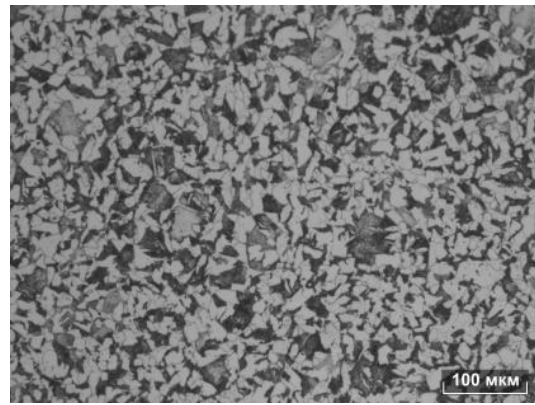


б

Рисунок 24 – Микроструктура осевой зоны образца 25-3: а-х100; б-х200

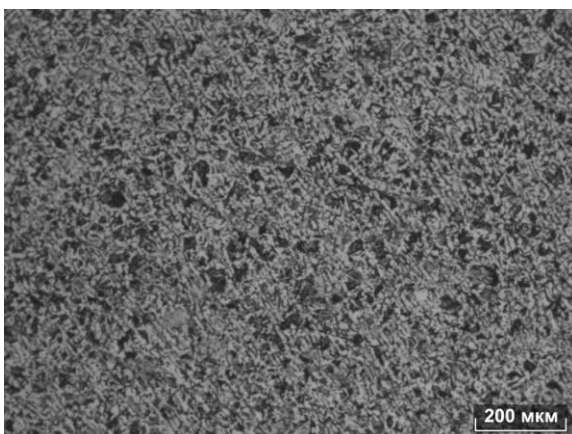


а

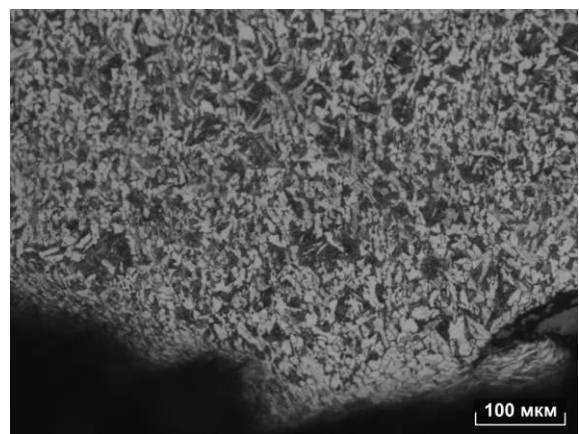


б

Рисунок 25 – Микроструктура  $\frac{1}{2}$  радиуса образца 25-3: а-х100; б-х200



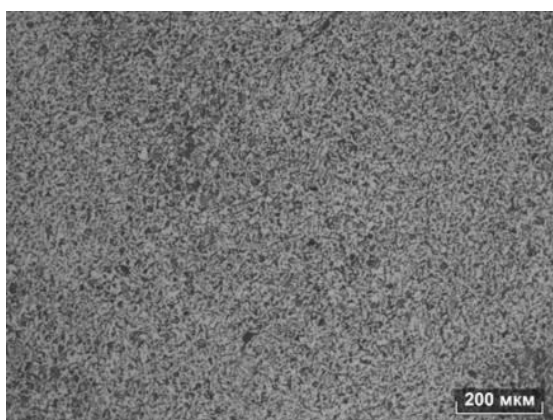
а



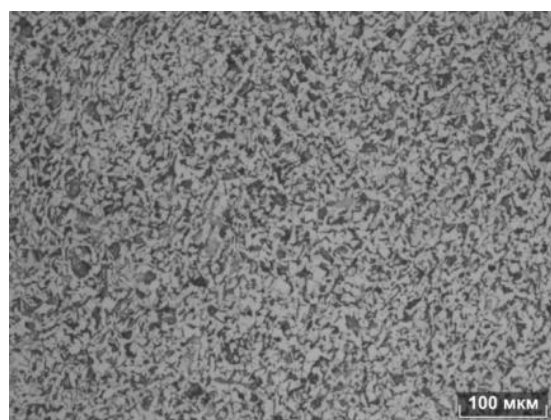
б

Рисунок 26 – Микроструктура у поверхности образца 25-3: а-х100; б-х200

Образец 10-2 имеет неоднородную феррито – перлитную структуру, имеются участки с большим количеством феррита (до 60%) и 10 баллом зерна, а также участки с преимущественно перлитной структуры – доля феррита 30%, балл зерна 7,5 (рисунок 27, 28). У поверхности балл зерна 8, доля феррита 30 %, имеется обезуглероженный слой порядка 120 мкм (рисунок 29).

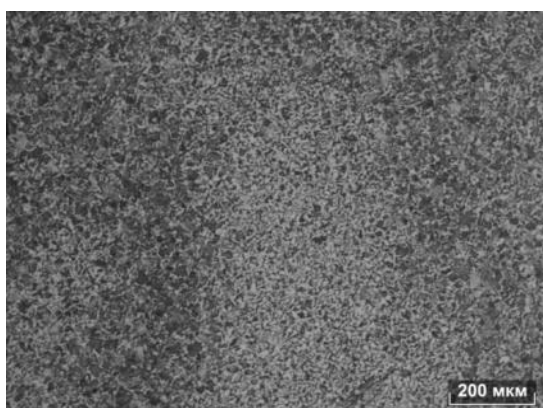


а

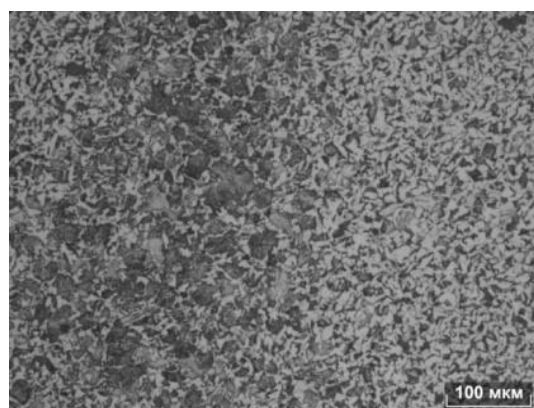


б

Рисунок 27 – Микроструктура осевой зоны образца 10-2: а-х100; б-х200



а



б

Рисунок 28 – Микроструктура на  $\frac{1}{2}$  радиуса образца 10-2: а-х100; б-х200

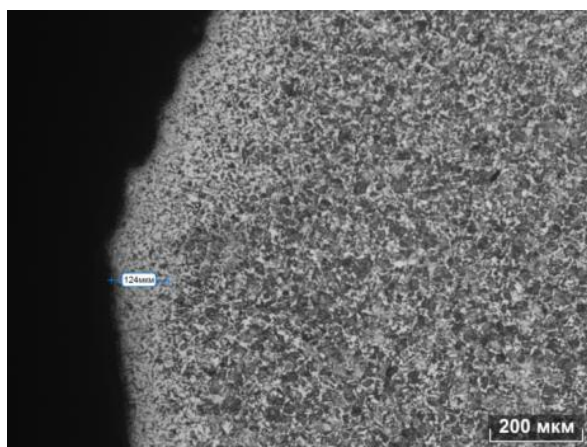


Рисунок 29 – Микроструктура у поверхности образца 10-2, x100

Образец 10-3 имеет неоднородную феррито – перлитную структуру. В осевой зоне имеются участки, с большим количеством феррита (до 50%) и 10 баллом зерна (рисунок 30). На  $\frac{1}{2}$  радиуса и у поверхности в структуре преобладают перлитные зёрна, доля феррита снижается до 30%, балл зерна 8,5 (рисунок 31, 32), также у поверхности имеется обезуглероженный слой глубиной 90-160 мкм.

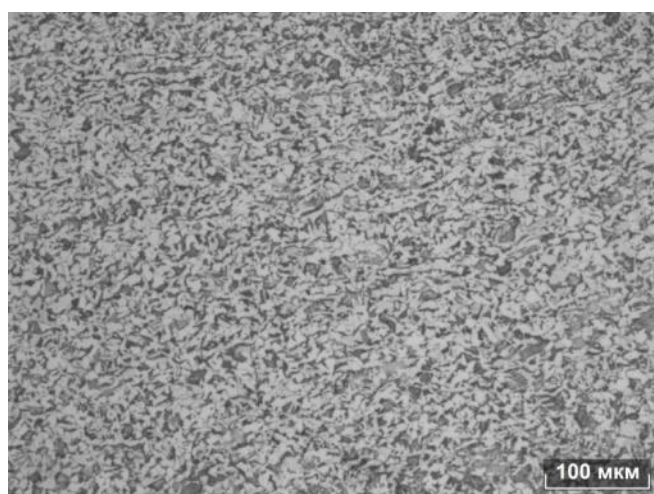


Рисунок 30 – Микроструктура осевой зоны образца 10-3, x200

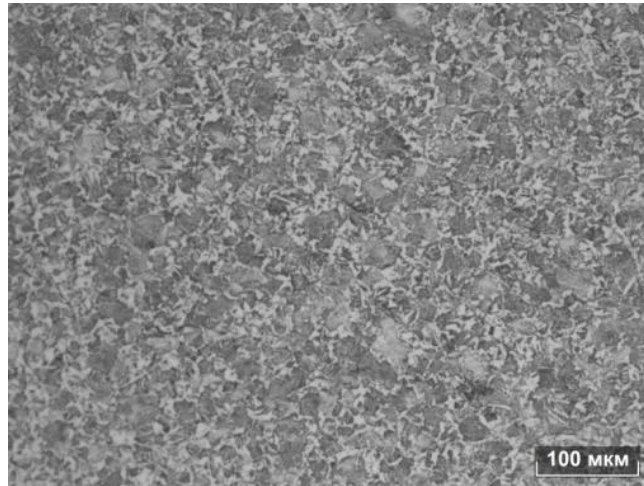
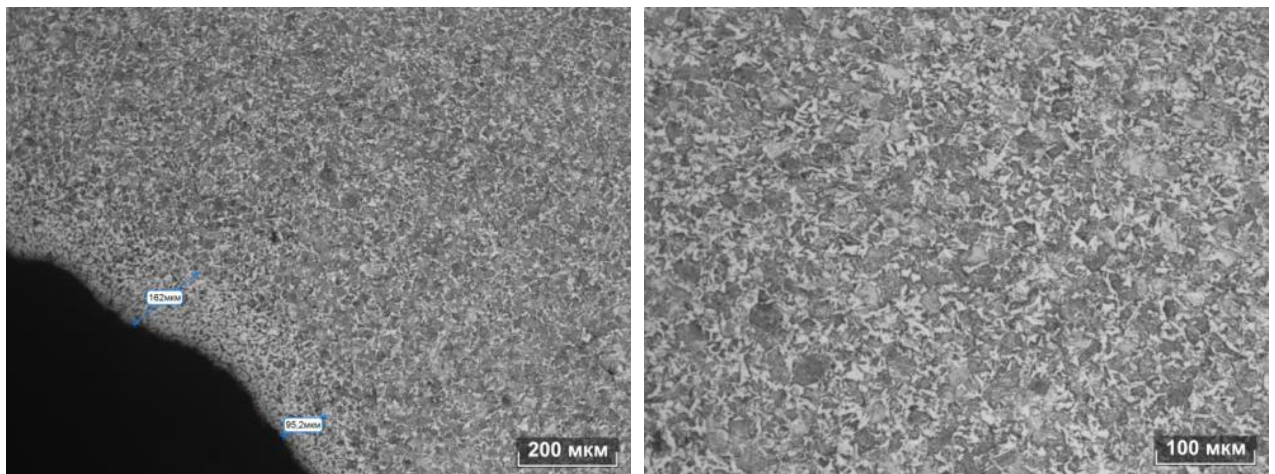


Рисунок 31 – Микроструктура  $\frac{1}{2}$  радиуса образца 10-3, x200



а

б

Рисунок 32 – Микроструктура у поверхности образца 10-3: а-х100; б-х200



### 3.4. Результаты механических испытаний

Для отобранных образцов профилей были проведены испытания на растяжения и измерения твердости для определения механических характеристик. Результаты испытаний на растяжение показаны в таблице 10.

Таблица 10 – Механические свойства арматурного проката класса А400С

| Образец                     |      | Временное сопротивление,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Предел текучести,<br>Н/мм <sup>2</sup> | Относительное удлинение, % |                |
|-----------------------------|------|---|--|----------------------------|----------------|
|                             |      |   |  | $\delta_5$                 | $\delta_{max}$ |
|                             |      | не менее                                      |  |                            |                |
| Требования<br>ГОСТ<br>34028 | А400 | 590   | 390                                    | 16,0                       | 5,0            |
| 10-2                        |      | 599   | 382                                    | 34                         | 20,3           |
| 10-3                        |      | 616   | 413                                    | 36                         | 14,8           |
| 25-2                        |      | 611   | 367                                    | 27,4                       | 15,3           |
| 25-3                        |      | 611   | 407                                    | 27,6                       | 16,3           |

Предел текучести в соответствии с ГОСТом 34028-2016 ниже требований для проб 10-2; 25-2. Также была замерена твердость образцов (по Бринеллю) в центре; ½ радиуса и у поверхности проката (таблица 11).

Таблица 11 – Твердость образцов

| Образец | Твердость, НВ |           |             |
|---------|---------------|-----------|-------------|
|         | Центр         | ½ радиуса | поверхность |
| 10-2    | 91,5          | 85        | 85          |
| 10-3    | 54,5          | 85,5      | 87,5        |
| 25-2    | 85            | 90        | 88          |
| 25-3    | 84,5          | 83        | 72          |

### 3.5. Выводы

На основании проведенных исследований по изменению химического состава сталей (замене ванадия на бор) было установлено, что продукция, изготовленная из металла опытной плавки удовлетворяет требованиям ГОСТа по всем параметрам. Имеющиеся провалы по значениям предел текучести носят случай, технологический характер.

В результате было установлено, что причины неудовлетворительных значений предела текучести образцов могут быть обусловлены следующими факторами:

1. При исследовании отбракованных образцов на растровом электронном микроскопе были обнаружены включения с цирконием – это продукты износа погружного стакана машины непрерывной литья заготовки (МНЛЗ). Так же в стали присутствуют неметаллические включения (оксиды строчечные) 2-3 балла, также имеются включения сложного состава, сформировавшиеся при выплавки стали и оказывающие негативное влияние на механические свойства.

2. Исследование микроструктуры образца 25-2 показало наличие в центре образца структуры видманштетт феррита – это свидетельствует о чрезмерном перегреве. При этой структуре сталь становится очень хрупкой и плохо выдерживает динамические нагрузки. У образца 10-2 на расстоянии  $\frac{1}{2}$  радиуса имеется ферритная сетка – это следствие неравномерного охлаждения стали, она уменьшает пластичность.

На основании полученных результатов были предложены рекомендации по ужесточению контроля за соблюдением технологи прокатки на предприятии.

При соблюдении технологии, в выплавке стали, разливке на МНЛЗ и прокатном переделе, можно получить арматурный прокат соответствующий ГОСТу 34028-2016.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено, что новый ГОСТ 34028-2016 ограничивает химический состав марок сталей и по нему нельзя использовать марки стали подходящие под старый ГОСТ 5781-1982 (25Г2С, 35ГС).

В связи с требованиями выдвигаемыми новым ГОСТом, для получения соответствующих механических свойств, было принято решение ввести в арматурный прокат – бор (микролегирование), который положительно влияет на сталь и повышает такие характеристики как: измельчение зерен, резкое улучшение прокаливаемости, повышение жаропрочности в результате упрочнения границ зерен боридами.

В результате проведенных нами исследованиях: химического состава готовой продукции, состава неметаллических включений, также металлография и измерение твёрдости. Были получены неудовлетворительные результаты, такие как: неметаллические включения (оксиды строчечные) 2-3 балла, также имеются включения сложного состава, Видманштеттовая структура, ферритная сетка, включение с цирконием. Поэтому для избежания получения в дальнейшем не благоприятных результатов, мы предлагаем ужесточить контроль за соблюдением технологии, в выплавке стали, разливке на МНЛЗ и прокатном переделе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левченко, Л.Н. Производство арматурной стали / Л.Н. Левченко, А.С. Натапов, Л.Ф. Машкин, Ю.Т. Худик, С.Л. Баскин. – М.: Metallurgy, 1984. – 136с.
2. Куприн, М.И. Основы теории прокатки / М.И. Куприн, М.С. Куприна. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Metallurgy, 1978. – 185с.
3. Гринберг, Е.М. Metallovedenie borsoderzhashchikh konstruktsionnykh staley / Е.М. Гринберг. – М.: МИСИС, 1997. – 198с.
4. Винокур, Б.Б. Структура конструкционной легированной стали / Б.Б. Винокур, В.Л. Пилюшенко, О.Г. Касаткин. – М.: Metallurgy, 1983. – 216с.
5. Левченко, Л.Н. Интенсификация производства мелкосортного проката на непрерывных станах / Л.Н. Левченко, Н.А. Гуров, Л.Ф. Машкин. – К.: Техника, 1980. – 272с.
6. ГОСТ 34028 – 2016. Межгосударственный стандарт. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия. Введен 01.01.2019 – М.: Издательство стандартов, 2018. – 42 с.
7. ГОСТ 5781 – 1982. Межгосударственный стандарт. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. Введен 30.06.1983 – М.: Издательство стандартов, 1983. – 12с.
8. ГОСТ 12004 – 1981. Межгосударственный стандарт. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. Введен 01.07.1983 – М.: Издательство стандартов, 1983. – 11с.