

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, начальник отдела  
ОМиТ ИТЦ ПАО «ЧМК»

\_\_\_\_\_ М.С. Кирпичников  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.,  
профессор

\_\_\_\_\_ Г. Г. Михайлов  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Обеспечение повышенного класса прочности 440 фасонного проката Z-  
образного профиля для вагоностроения

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ-22.04.02.2019.149 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

д.ф-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ К.Ю. Окишев  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта

Студент группы П-243

\_\_\_\_\_ С.Н. Веселков  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер

д.ф-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ К.Ю. Окишев  
\_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Веселков С.Н. Обеспечение повышенного класса прочности 440 фасонного проката Z-образного профиля для вагоностроения – Челябинск: ЮУрГУ, П-243, 2019. – 60 с., 32 ил., 21 табл., библиогр. список – 11 наим.

Магистерская диссертация выполнена с целью обеспечения уровня механических свойств для зетового профиля Z310 для хребтовой балки с классом прочности 440 на ПАО «ЧМК».

В магистерской диссертации проанализированы все этапы освоения профиля Z310 на предприятии, обработана статистика с большим количеством партий-плавков по механическим свойствам совместно с химическим составом, изучена микроструктура профиля Z310.

Разработана регрессионная модель зависимости механических свойств от химического состава, которая позволяет прогнозировать требуемые свойства Z-образного профиля.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                 | 6  |
| 1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ<br>ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ .....                 | 7  |
| 1.1 Общие сведения .....                                                                       | 7  |
| 1.2 Механизмы упрочнения строительных сталей .....                                             | 9  |
| 1.3 Влияние химических элементов на свойства стали .....                                       | 14 |
| Выводы по разделу один .....                                                                   | 17 |
| 2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ .....                                                                         | 19 |
| 2.1 Производство зетового профиля Z310 на ПАО «ЧМК» .....                                      | 19 |
| 2.1.1 Первый этап опробования производства профиля Z310 .....                                  | 19 |
| 2.1.2 Второй (повторный) этап опробования производства профиля<br>Z310.....                    | 19 |
| 2.1.3 Третий этап опробования производства профиля Z310 .....                                  | 21 |
| 2.1.4 Четвертый этап опробования производства профиля Z310 .....                               | 25 |
| 2.1.5 Пятый этап опробования производства профиля Z310 .....                                   | 27 |
| 2.1.6 Опробования производства профиля Z310 из НЛС .....                                       | 29 |
| 2.1.7 Дальнейшее производство зетового профиля Z310 .....                                      | 34 |
| 2.2 Проведение опыта .....                                                                     | 35 |
| 2.2.1 Отбор проб на испытания механических свойств .....                                       | 35 |
| 2.2.2 Анализ диаграммы переохлажденного аустенита .....                                        | 36 |
| 2.2.3 Изучение микроструктуры .....                                                            | 38 |
| 2.2.4 Построение модели зависимости механических свойств от<br>химического состава стали ..... | 52 |
| Выводы по разделу два .....                                                                    | 58 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                               | 59 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                                                 | 60 |

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных конструкций вагонов железнодорожного транспорта является рама, основание кузова, которая состоит из трех основных несущих продольных балок: боковых, поперечных и хребтовых.

Хребтовая балка служит для крепления на ней автосцепного и тормозного оборудования. Через автосцепное устройство она передает продольные силы на другие вагоны. Но поскольку она жестко связана и с другими элементами кузова, то наряду с продольными воспринимает также и вертикальные силы. Ее изготавливают из мощных прокатных Z-образных, швеллерных и двутавровых профилей [1].

Хребтовая балка состоит из двух зетобразных профилей (Z310), между которыми по консольным частям балки комплектно закреплены передний и задний упоры, предназначенные для передачи ударно-тяговых нагрузок от автосцепки на хребтовую балку и раму вагона.

Для зетового профиля (Z310) предъявляются очень жесткие механические требования, а именно высокий предел прочности, предел текучести, высокая вязкость и коррозионная стойкость на воздухе. Получаемые на данный момент свойства профиля относятся к классу прочности не выше 390. Однако заказчикам также требовался профиль (Z310) с классом прочности 440 и выше. Но на данный момент такой уровень механических свойств для марки стали 12Г2ФД получить стабильно не удалось.

Целью магистерской диссертации является изучение этапов производства опытных партий зетового профиля (Z310) на ПАО «ЧМК» для хребтовой балки с получаемыми механическими свойствами, и на основании изученного материала, попытаться обеспечить уровень механических свойств для зетового профиля с классом прочности 440.

# 1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ

## 1.1 Общие сведения

В июле 2013 года был введен в эксплуатацию универсальный рельсобалочный стан (УРБС) Прокатного цеха №3 на ПАО «ЧМК». УРБС – первое в России комплексное универсальное производство высококачественного фасонного проката и рельсов длиной от 12,4 до 100 м. Комплекс УРБС включает в себя все необходимые технологические операции и использует последние мировые разработки в области прокатки, закалки, правки, отделки и контроля качества проката. Мощность УРБС на начало производства составляло до 1,1 млн. тонн готовой продукции в год, и с каждым годом этот показатель растет. Объем инвестиций составил около 715 млн. долларов США. Рельсы, произведенные на УРБС, планировались поставляться ОАО «РЖД» в рамках реализации «Стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2030 года», одобренной Правительством РФ и предполагающей модернизацию и строительство новых железных дорог по всей территории страны. В июне 2015 года ЧМК получил сертификат соответствия требованиям Технического регламента Таможенного союза на рельсы до 100 метров. Сертификация позволила комбинату начать поставки продукции в адрес ОАО «РЖД».

Относительно недавно на УРБС был освоен зетовый профиль Z310 для хребтовой балки с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90. Освоение профиля проходило в несколько этапов. Опытные партии прокатывали из марок стали СтЗсп5, 09Г2С и 12Г2ФД с классами прочности 345, 375 и 390. На стане УРБС невозможно осуществить термическую обработку балочной продукции, вследствие чего, весь фасонный прокат поставляется в горячекатаном состоянии.

Схема зетового профиля и его геометрические параметры представлены на рисунке 1.1 [2].

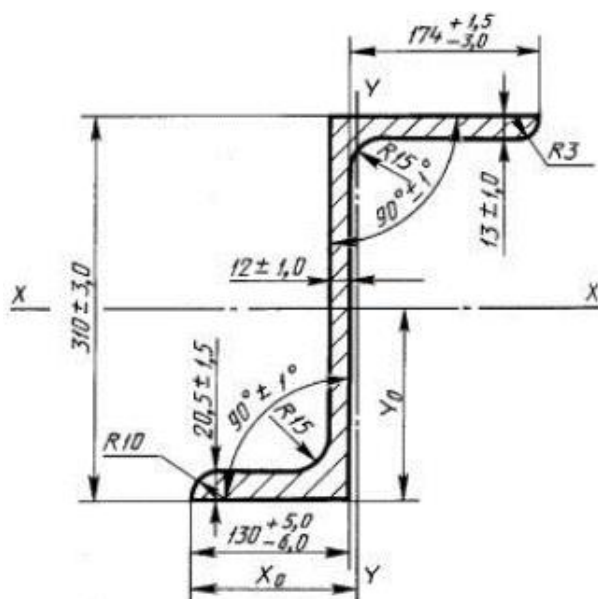


Рисунок 1.1 – Схема зетового профиля Z310

Как уже отмечалось, для зетового профиля (Z310) предъявляются очень жесткие механические требования, а именно высокий предел прочности, предел текучести, высокая вязкость и коррозионная стойкость на воздухе. По технологическим свойствам сталь должна обладать хорошей свариваемостью, так как хребтовую балку сваривают с остальными частями кузова рамы вагона. Поэтому этот профиль обычно изготавливают из строительной марки стали повышенной прочности.

Механические свойства сталей повышенной прочности сильно зависят от толщины проката. Например, с увеличением толщины сечения проката снижаются значения предела текучести (толщина тонкой полки зетового профиля Z310 равен 13 мм, толстой – 20,5 мм).

Рекомендуемые марки стали для зетового профиля согласно ГОСТ 5267.3-90 являются 09Г2Д и 10Г2БД. Допускаются и другие марки стали, если они согласованы с заказчиком. Механические свойства для профиля Z310 из стали марки 10Г2БД должны соответствовать нормам, приведенным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Механические свойства профиля Z310 из стали марки 10Г2БД по ГОСТ 5267.0-90[3]

| Наименование профиля | $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\delta_5$ , % | Ударная вязкость КСУ, Дж/ см <sup>2</sup> |                 |       |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------------------|-----------------|-------|
|                      |                                |                                |                | после мех. старения                       | при температуре |       |
|                      |                                |                                |                |                                           | -40°С           | -60°С |
| Z310                 | 490                            | 375                            | 21             | 29                                        | 29              | 29    |

Существенный прогресс в создании грузовых вагонов нового поколения может быть достигнут применением современных конструкционных материалов высокой прочности и повышенной коррозионной стойкости с низкой удельной массой, к которым относятся низколегированные стали класса прочности 440-500.

Так, например, с целью определения возможности производства фасонного проката высокой прочности категории 440 на ОАО «НТМК» была проведена выплавка стали и прокатка зетового профиля для полувагонов из Mn – Mo стали с микродобавкой ванадия марки 12Г2МФАЮД. По словам авторов [4], опытную плавку проводили в дуговой сталеплавильной печи фасонно-литейного цеха НТМК. Химический состав стали приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Химический состав стали 12Г2МФАЮД

| Показатель     | C          | Mn      | Si      | P             | S     | Cu      | Mo        | V         | Ti        |
|----------------|------------|---------|---------|---------------|-------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Требования НД  | 0,10-0,014 | 1,4-1,7 | 0,2-0,4 | не более 0,02 |       | 0,2-0,4 | 0,15-0,25 | 0,05-0,12 | 0,05-0,12 |
| Опытная плавка | 0,13       | 1,37    | 0,19    | 0,015         | 0,013 | 0,24    | 0,17      | 0,11      | 0,02      |

Слиток опытной стали был передан в обжимной цех, где был прокатан на заготовку сечением 200x520 мм. Раскат кроили на две заготовки, первая маркировалась литерой «А», вторая – литерой «Б». После обжимного стана были получены две заготовки сечением 200x520 мм и длиной порядка 4 м. Прокатка профиля Z310 из стали марки 12Г2МФАЮД была проведена в рельсобалочном цехе. Температура металла на выходе составляла 1260...1270°С, время нагрева 3 - 3,5 ч. Были отобраны пробы от опытных раскатов и для сравнения – от серийного металла из стали марки 09Г2С для испытаний механических свойств и исследование микроструктуры.

Результаты сдаточных испытаний механических свойств опытного и сравнительного металла приведены в таблице 1.3. На сравнительной марке стали 09Г2С получили категорию прочности 345, на профиле на опытной марки стали 12Г2ФАЮД – категорию прочности 440. Пластичность опытной стали была ниже, чем у сравнительной, но на достаточно высоком уровне при данной категории прочности.

Таблица 1.3 – Сдаточные испытания зетового профиля

| Марка стали                              | Маркировка | $\sigma_T$        | $\sigma_B$ | $\delta_5, \%$ | КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , |                      |
|------------------------------------------|------------|-------------------|------------|----------------|---------------------------|----------------------|
|                                          |            | Н/мм <sup>2</sup> |            |                | -40°С                     | После мех. Ста-рения |
| 12Г2МФАЮД                                | А          | 479               | 560        | 18             | 156                       | 212                  |
|                                          | Б          | 488               | 579        | 22             | 168                       | 201                  |
| Требования НД                            |            | 450               | 550        | 18             | 39                        | 29                   |
| 09Г2С                                    | Г          | 363               | 481        | 27             | -                         | 218                  |
| Требования ГОСТ 19281-2014, кат. 345 [5] |            | 345               | 480        | 21             | 34                        | 29                   |

Структура зетового профиля из стали марки 09Г2С состоит из феррита и перлита. Основная структурная составляющая феррит, доля перлита колеблется в пределах 20-30%. Структура зетового профиля из стали 12Г2МФАЮД полностью феррито-бейнитная. Соотношение структурных составляющих 70(феррит) и 30(бейнит). Размеры зерен толстой и тонкой полок близки.

Таким образом, на ОАО «НТМК» удалось получить уровень механических свойств, соответствующей категории прочности 440 для зетового профиля Z310 из стали марки 12Г2МФАЮД. Такие механические свойства получились за счет использования малоуглеродистой стали с добавлением 0,17% молибдена и 1,4% марганца, что привело к карбонитриднему упрочнению стали. Авторы этой работы также отмечают, что при таких высоких значениях прочности, опытная сталь на ударных образцах показывала высокий уровень ударной вязкости при отрицательных температурах и достаточно хорошую пластичность.

## 1.2 Механизмы упрочнения строительных сталей

Как правило, строительные стали повышенной прочности поставляют в горячекатаном состоянии с феррито-перлитной структурой. Основными легирующими элементами в этих сталях являются недорогие и доступные элементы как

марганец, кремний, а в стали ряда марок дополнительно добавляют хром, ванадий, ниобий, титан, медь, фосфор [6]. Медь добавляют для повышения стойкости к атмосферной коррозии. Примеры таких сталей следующие: 09Г2С, 09Г2Д, 10Г2БД, 12Г2ФД и т. д.

Основные путями изменения микроструктуры данного типа сталей, приводящие к повышению прочности строительных сталей, являются: повышение плотности дислокаций; образование твердых растворов; изменение размера зерна; образование дисперсных частиц второй фазы [7].

При повышении плотности дислокаций в результате наклепа прочность стали растет из-за появления полей напряжений вокруг скоплений дислокаций и прямого взаимодействия дислокаций в процессе пластической деформации. Упрочнение железа при деформации на 10% составляет примерно 500 Н/мм<sup>2</sup>.

Образование твердых растворов характерно для легированных сталей. Например, в сталях, которые легированы марганцем и кремнием (09Г2С, 17ГС), преобладает твердорастворное упрочнение. При этом упрочнение феррита вызвано разницей в атомных размерах железа и легирующего элемента, их упругих постоянных, а также химического и электрического взаимодействий. При содержании в стали до 2% Mn и до 1 % Si прочность феррита можно повысить на 150-200 Н/мм<sup>2</sup>. Добавление ванадия и ниобия в сталь (10Г2Б, 15Г2СФ), приводит к дисперсионному упрочнению и упрочнению вследствие измельчения зерна в результате образования дисперсных карбидов VC и NbC.

Границы зерен в строительных сталях могут иметь резко различные природу и строение. В сталях с феррито-перлитной структурой упрочнение в результате измельчения зерна наиболее эффективно происходит при разделении кристаллов феррита большеугловыми границами. Термически упрочненные стали характеризуются несколькими системами границ зерен: большеугловыми границами действительного аустенитного зерна, малоугловыми границами ферритного субзерна и т. п.

Упрочнение, вызванное измельчением зерна, разделенного большеугловыми границами, описывается выражением (1)

$$\Delta\sigma_3 = kd^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_3$  - зернограницное упрочнение;

$d$  – диаметр зерна, мкм;

$k$  – коэффициент, характеризующий прочность блокировки дислокаций примесными атомами (для низколегированной стали  $k = 0,7...0,71$ ).

При малоугловых разориентировках на границах субзерен из-за различий в разориентировках возможны различные законы упрочнения. Так, например

$$\Delta\sigma_c = k'l^{-n}, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_c$  - субзеренное упрочнение;

$l$  – размер субзерен, мкм;

$k$  – коэффициент, равный для низкоуглеродистых сталей 0,005;



$n$  – показатель степени зависит от характера субструктуры – степени разориентировки, наличие избыточных дислокаций и т.д. При переходе от субструктуры, в которой границы разориентированы на  $0,5 - 0,7^\circ$ , к разориентировке на  $3 - 7^\circ$  влияние границ на прочность усиливается и  $n$  может измениться от 1 до  $3/4$ .

При формировании совершенной субзеренной структуры упрочнение определяется величиной  $\Delta\sigma_c$ , которая в ряде случаев больше  $\Delta\sigma_s$ . При таком упрочнении сталь с размером зерна около 1 мкк может иметь предел текучести порядка 900 Н/мм<sup>2</sup> [7, 61].

Особо важное значение для повышения прочности строительных сталей имеет механизм упрочнения частицами второй фазы. В строительной стали присутствует весьма широкий набор частиц, различающихся между собой по природе, твердости, размерам, морфологии, распределению и т.д. В первую очередь их следует разделить на агрегатные, где частицы второй фазы окружены несколькими зернами матрицы, и дисперсные, где каждая частица полностью окружена одинаково ориентированной матрицей.

Наиболее ярким примером агрегатных частиц в стали являются жесткие зерна перлита. Во многих работах упрочнение от действия перлитной составляющей в стали с ферритной матрицей определяется по следующей Формуле (3):

$$\Delta\sigma_{\text{п}} = 0,24П, \quad (3)$$

где  $П$  – содержание перлита в стали, % (об.);

0,24 – эмпирический коэффициент [7, 61].

В сталях с повышенным содержанием углерода (до 0,20%), упрочнение происходит в большей степени за счет перлита, однако это приводит, как правило, к уменьшению ударной вязкости.

Другой тип агрегатных частиц, которые могут оказывать влияние на механические свойства сталей высокой прочности – неметаллические включения. Однако упрочняющего действия такие частицы не оказывают.

Важное значение для повышения прочности строительных сталей имеет упрочнение дисперсными частицами. В этом случае увеличение предела текучести зависит от числа частиц, их размера, характера распределения, расстояния между ними, степени несоответствия решеток матрицы и выделившихся частиц. Упрочнения определяются механизмом взаимодействия полос скольжения с выделившимися частицами.

Из большого числа механизмов дисперсионного упрочнения наиболее приемлемым для рассматриваемых сталей является механизм Орована, предложенный для расчета упрочнения некогерентными частицами, расположенными на расстоянии значительно большем их радиуса. Типичными частицами подобного вида в строительной стали являются дисперсные карбиды и карбонитриды ванадия и ниобия.

Упрочнение  $\Delta\sigma_{\text{д.ч}}$ , вызванное дисперсными частицами, в строительных сталях подсчитывается по формуле Орована (4):

$$\Delta\sigma_{д,ч} = \frac{mGb}{2\pi(\lambda-2r)} \cdot \Phi \ln \frac{\lambda-2r}{2b}, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус частицы;

$\lambda$  – расстояние между центрами частиц;

$\Phi$  – коэффициент, характеризующий тип дислокаций, взаимодействующих с частицами ( $\Phi = 1,25$ );

$m = 0,85$  – ориентационный множитель;

$G$  – модуль сдвига;

$b$  – вектор Бюргерса.

Упрочнение, вызванное дисперсными частицами, в строительных сталях достигает  $150 \text{ Н/мм}^2$ .

Для оценки эффективности того или иного механизма упрочнения сталей необходимо проанализировать склонность стали к хрупким разрушениям, обусловленным соответствующим механизмом упрочнения. Для этого удобно использовать соотношения (5) и (6):

$$\sigma_T k d^{1/2} \neq \beta G \gamma; \quad (5)$$

$$\left( \sigma_0 d^{\frac{1}{2}} + k \right) k \neq \beta G \gamma, \quad (6)$$

где  $G$  – модуль сдвига;

$\beta$  – величина, обратная жесткости напряженного состояния;

$\gamma$  – поверхностная энергия трещины;

$\sigma_0$  – напряжение трения кристаллической решетки  $\alpha$ -железа.

Сталь разрушается вязко, если левая часть соотношений меньше правой, и хрупко, если левая часть больше. Поэтому при увеличении характеристик в левой части неравенства и соответственно уменьшении в правой части растет склонность стали к хрупкому разрушению.

Наибольшее охрупчивающее действие оказывают атомы внедрения, поскольку они существенно увеличивают показатели  $\sigma_0$  и  $k$ .

Из легирующих элементов, образующих с железом твердые растворы замещения, наиболее интенсивно повышают температуру перехода в хрупкое состояние фосфор и кремний – элементы, обеспечивающие наибольший упрочняющий эффект. Охрупчивание феррита этими элементами связано с их воздействием на  $\sigma_0$ . Кроме того, фосфор и кремний затрудняют поперечное скольжение, что приводит к увеличению  $k$ . Наконец, фосфор сильно сегрегирует по границам зерен, снижая  $\gamma$ .

Измельчение зерна является единственным методом упрочнения, приводящим к повышению сопротивления стали хрупким разрушениям, что видно из анализа соотношений (5) и (6). С измельчением зерна уменьшается длина дислокационных скоплений, а следовательно, и концентрация напряжений у границ, особенно при большеугловых разориентировках. У низколегированных сталей уменьшения размера зерна на один балл снижает порог хладноломкости на  $10-20^\circ\text{C}$ .

Твердые растворы имеют более высокую температуру рекристаллизации, чем чистые металлы. Поэтому при одинаковом режиме термической обработки легированные стали имеют более мелкое зерно, чем углеродистые. Частицы второй фазы, как правило, сдерживают рост зерен. Никель также эффективно измельчает зерно, хотя и не образует стабильных соединений с примесями внедрения. Измельчается зерно и при легировании кремнием. Изменение размеров зерна под влиянием легирующих элементов, содержащихся в твердом растворе, может существенно вуалировать их влияние или воздействие дисперсных частиц на температуру перехода стали в хрупкое состояние.

Строчечные выделения карбида ванадия, особенно по границам зерен, приводят к существенному повышению порога хладноломкости. Поэтому они считают более целесообразным легировать низкоуглеродистые стали азотом и нитридообразующими элементами, поскольку нитриды ванадия выделяются по границам аустенитных зерен в значительно меньшей степени, чем карбиды ванадия.

Большой интерес представляет действие дисперсных частиц, утоняющих матрицу. Обычно считают, что дисперсные частицы охрупчивают матрицу; однако общее действие их на хладостойкость благоприятно из-за эффекта измельчения зерна. С точки зрения стимулирования хрупкого разрушения более опасны частицы MnS эллипсоидной формы, действующие как острые надрезы.

Таким образом, механизмы упрочнения неоднозначно влияют на склонность стали к хрупкому разрушению. Измельчения зерна является универсальным методом, повышающим не только прочность, но и сопротивление стали хрупкому разрушению. Упрочнение же стали, вызванное повышением плотности дислокаций, особенно при сильной блокировке последних, приводит к резкому охрупчиванию материала. Поэтому стали с одинаковой прочностью могут иметь совершенно различное сопротивление хрупкому разрушению, если соответствующий уровень прочности достигается в результате реализации различных механизмов упрочнения.

Расчет вклада отдельных упрочняющих факторов в предел текучести или предел прочности выполняется методами линейного многофакторного регрессионного анализа с помощью стандартной программы. При таком подходе все независимые переменные могут быть найдены химическими или металлографическими методами.

Для горячекатанных или нормализованных марганцовисто-кремнистых сталей феррито-перлитного класса можно использовать следующие уравнение:

$$\sigma_T = 93 + 42Mn + 71Si + 1,5П + 53d^{-1/2}, \quad (7)$$

где Mn, Si, П – содержание марганца, кремния и перлита в стали соответственно, %.

В общем случае известно, что предел текучести сталей с феррито-перлитной структурой, в том числе с нитридным упрочнением, с учетом повышения плотности дислокаций и наличия субструктуры приблизительно можно оценивать по формуле (8):

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{T,p} + \Delta\sigma_{\Pi} + \Delta\sigma_{д,ч} + \Delta\sigma_{д} + \Delta\sigma_{з} \text{ (или } \Delta\sigma_{с}), \quad (8)$$

где  $\sigma_0$  - напряжение трения решетки  $\alpha$ -железа;

$\Delta\sigma_{T,p}$  - упрочнение твердого раствора (феррита) растворенными в нем легирующими элементами;

$\Delta\sigma_{\Pi}$  - упрочнение благодаря наличию перлита;

$\Delta\sigma_{д,ч}$  - упрочнение собственно дисперсными частицами;

$\Delta\sigma_{д}$  - упрочнение благодаря повышению плотности дислокаций;

$\Delta\sigma_{з}$  - зернограничное упрочнение; субзеренное упрочнение, при учете которого зернограничное упрочнение в пределе текучести стали не учитывается.

### *1.3 Влияние химических элементов на свойства стали*

К основным факторам, определяющим механические свойства низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой, относятся: образование твердых растворов (внедрения), размер зерен, дисперсионное твердение и количество перлита.

Степень влияния каждого из отмеченных факторов зависит от системы легирования и некоторых технологических приемов (условий нагрева при горячей обработке давлением, температуры конца последней, режима нормализации и др.) [8]. В ряде случаев легирование одним элементом может влиять одновременно на несколько факторов. В равной степени ряд легирующих элементов может вызвать изменение одного и того же фактора, например упрочнение твердого раствора марганцем, кремнием, медью и др.

Важно знать влияние легирующих элементов на такие характеристики, как склонность к росту зерна, нитридо- и карбидообразованию и др. По отношению к углероду легирующие элементы делятся на карбидообразующие (Nb, Zr, Ti, V, W и др.) и некарбидообразующие (Ni, Si, Co, Al и др.). К нитридообразующим элементам относятся Al, Zr, V, Ti и др., к нитридонеобразующим — Ni, Si, Cu и др.

Углерод и азот обладают исключительно малой растворимостью в феррите; при повышенных количествах углерод в стали находится в виде карбидов, а азот — нитридов или карбонитридов. С повышением содержания углерода увеличивается количество перлитной составляющей в структуре, что сопровождается упрочнением стали — повышенного временного сопротивления.

Значительно большее влияние, чем на временное сопротивление, углерод оказывает на предел текучести, поэтому он уменьшает отношение  $\sigma_T/\sigma_B$ .

С повышением прочности стали снижаются, как правило, ее пластические и вязкие свойства, а также ухудшается сопротивление хрупкому разрушению. Увеличение количества перлита (углерода) сопровождается повышением критической температуры хрупкости.

Следует иметь в виду, что углерод повышает чувствительность стали к перегреву и к скорости охлаждения, а также усиливает закаляемость стали, поэтому он резко отрицательно сказывается на свариваемости. Поскольку хорошая свариваемость

ваемость является одним из основных требований, предъявляемых к низколегированной стали, постольку максимальное содержание углерода должно находиться в соответствии с другими легирующими и не превышать 0,20-0,22 %.

Азот, растворенный в феррите, оказывает исключительно сильное отрицательное влияние на хладостойкость низколегированных сталей. Это связано с тем, что, внедряясь в феррит, азот упрочняет сталь, т.е. сильно возрастает величина  $\sigma_0$  в выражении (6); хорошо известно, что сегрегации атомов азота (облака) блокируют движение дислокаций, увеличивая  $k$  (6); сегрегации азота располагаются по плоскости [001], снижая  $\gamma$  (6), и способствуют разрушению сколом, реализующемуся в кристаллах с ОЦК-решеткой именно по плоскостям [001]. Наконец, азот сегрегирует к границам зерен, также увеличивая  $k$  и снижая  $\gamma$ . Поэтому одна из основных задач раскисления и легирования стали — ослабление отрицательного действия свободного азота и возможно полное удаление этого элемента из твердого раствора.

*Марганец, кремний, хром, никель, медь* являются наиболее распространенными элементами в низколегированных сталях. При содержании углерода до 0,2 % рассматриваемые элементы преимущественно находятся в твердом растворе (за исключением хрома, образующего частично карбид, и меди, которая при содержании равном или менее 0,7% вызывает дисперсионное твердение), обуславливая повышение прочностных характеристик. Из рассматриваемых элементов кремний и марганец наиболее сильно упрочняют сталь.

Присутствие марганца в количестве 1,1-1,5% в стали с 0,15% С сопровождается повышением предела текучести с 310 до 390 Н/мм<sup>2</sup>. Степень упрочнения от легирования кремнием практически такая же: 1 % Si повышает предел текучести на 79 Н/мм<sup>2</sup>. Раздельное легирование стали хромом, никелем и медью оказывает небольшое влияние на предел текучести: 2 % Ni повышает с 280 до 340 Н/мм<sup>2</sup>, 1 % Cu – на 40 Н/мм<sup>2</sup>. Упрочняющее влияние хрома усиливается с повышением содержания углерода или при комплексном легировании. Явление дисперсионного твердения, связанное с изменением растворимости меди и феррите, вызывает повышение прочностных и снижение пластических и вязких свойств. Эффект дисперсионного твердения обычно возрастает с уменьшением содержания в стали углерода и несколько снижается в присутствии элементов, образующих растворы с медью (марганца, никеля, кремния). Легирование медьсодержащих сталей вторым элементом обязательно, так как медь в количестве равном или менее 0,3% приводит к красноломкости; такое влияние меди нейтрализуется введением никеля в соотношении 1:2.

Марганец до 1,5-2,0% (в зависимости от углерода) повышает сопротивление стали и железа хрупкому разрушению. Однако легирование стали большим количеством марганца сопровождается образованием промежуточных структур с соответствующим ухудшением хладостойкости стали.

Вредное влияние кремния на условные пороги хладноломкости начинает проявляться при содержании более 0,8% (особенно более 1,1%). В меньших количествах кремний снижает ударную вязкость и мало влияет на порог хладноломкости.

Марганец эффективно упрочняет твердый раствор из-за значительных различий атомных диаметров. Также следует заметить, что легирование марганцем приводит к измельчению зерен феррита и участков перлита.

При пластическом деформировании марганец увеличивает склонность к образованию ячеистой структуры, что способствует увеличению вязкости разрушения и хладостойкости. Марганец снижает степень блокировки движения дислокаций сегрегациями азота и уменьшает склонность к охрупчиванию при деформационном старении, поскольку задерживает выделение нитридов, в целом этот элемент приводит к снижению  $k$  в формуле (6). Кроме того, марганец вызывает перераспределение карбидов от границ внутрь зерен, что ведет к увеличению  $\gamma$  при разрушении.

Марганец повышает низкотемпературную пластичность железа и понижает температуру вязкохрупкого перехода (несмотря на рост  $\sigma_i$  из-за благоприятного влияния на размер зерна), морфологию карбидной фазы, одновременно увеличивает максимальные значения ударной вязкости.

В небольших количествах (до 0,9%) кремний может оказывать даже благоприятное влияние на условный порог хладноломкости железа высокой степени чистоты. Подобное влияние объясняется эффективным упрочнением феррита из-за существенного различия в размерах атомов кремния и железа. Легирование кремнием увеличивает склонность железа к скольжению по одной системе плоскостей  $\{110\}$ , что ведет к развитию плоской микродеформации, затрудняет поперечное скольжение и препятствует образованию при пластической деформации ячеистой структуры, повышая тем самым склонность к хрупкому разрушению.

*Ванадии, ниобии, титан.* Растворение в феррите этих элементов вызывает интенсивное упрочнение последнего, однако это сопровождается резким падением его пластичности и вязкости. В то же время эти элементы, измельчая структуру благодаря дисперсионному твердению, обеспечивают получение у стали хорошего комплекса механических свойств.

Общепризнанно, что в горячекатаном состоянии наиболее существенно повышает предел текучести ниобий, который в количестве 0,02% уже замедляет рост зерна и обеспечивает получение мелкозернистой структуры (балл 9-11).

Для получения такого же эффекта упрочнения содержание ванадия должно быть в 2-3 раза выше. О характере его влияния на размер зерна имеются противоречивые сведения. В настоящее время об этом можно сказать следующее: в кипящих и полуспокойных сталях ванадий способствует получению мелкозернистой структуры, в то время как в хорошо раскисленной алюминием стали эффект от введения ванадия меньше.

Титан измельчает структуру (балл 10-11) и повышает механические свойства стали.

Следует отметить, что уже небольшие присадки титана (0,01-0,03%) эффективно измельчают первичную структуру металла, поскольку образующиеся в жидкой стали нитриды титана служат центрами кристаллизации. В настоящее время считается, что рационально именно содержание титана в низколегированных сталях.

Наилучшим способом достижения высокого дисперсионного твердения является использование для микролегирования не одного, а нескольких элементов, так как в этом случае при любой температуре аустенитизации количество растворенных элементов и последующее их выделения больше, чем при отдельном легировании.

Измельчению структуры и дисперсионному твердению способствуют нитриды и карбонитриды рассматриваемых элементов, в первую очередь, нитриды ванадия. Указанные процессы оказывают противоположное влияние на хладостойкость низколегированных сталей: дисперсионное твердение ухудшает, а измельчение структуры улучшает это свойство, поэтому суммарный эффект будет зависеть от их соотношения.

Установлено, что содержание ванадия и титана в конструктивных сталях следует ограничивать:  $V \leq 0,10 \%$ ,  $Ti \leq 0,03\%$ .

*Алюминий* является основным раскислителем малоуглеродистых сталей и добавляется, как правило, в количестве 0,4-2,0 кг/т. В случае он мало влияет на прочностные свойства, но заметно на ряд других характеристик. В больших количествах алюминий существенно упрочняет феррит в равновесном состоянии. Небольшие присадки алюминия заметно повышают температуру роста зерна; это, главным образом, объясняется тем, что небольшие присадки алюминия обычно способствуют повышению вязкости и хладостойкости. При повышенных присадках ( $\geq 0,2\%$ ) алюминий, упрочняя твердый раствор, отрицательно влияет на порог хладноломкости. Порог хладноломкости раскисленных алюминием сталей смещен в сторону более низких температур на 30-80 °С в зависимости от системы легирования и их состояния. Общеизвестно, что малые присадки алюминия действуют через нитрид алюминия, образующий «барьеры», препятствующие росту зерна. С повышением температуры нитриды коагулируют и растворяются в аустените, что приводит к росту зерна. Растворение начинается при температуре несколько выше 1100 °С и завершается примерно при 1350 °С.

С увеличением количества нитридов алюминия в низколегированной стали измельчается зерно феррита, и это приводит к повышению предела текучести. Считается, что для получения хорошего сочетания прочностных и вязких свойств содержание нитрида алюминия должно быть 0,03-0,08%, что обеспечивает получение зерна в пределах 0,007-0,01 мм.

Как было показано выше, размер зерна является наиболее важной характеристикой, улучшающей ударную вязкость и хладостойкость стали.

### *Выводы по разделу один*

Для зетового профиля (Z310) предъявляются очень жесткие механические требования, а именно высокий предел прочности, предел текучести, высокая вязкость и коррозионная стойкость на воздухе. По технологическим свойствам сталь должна обладать хорошей свариваемостью, так как хребтовую балку сваривают с

остальными частями кузова рамы вагона. Поэтому этот профиль обычно изготавливают в горячекатаном состоянии с феррито-перлитной структурой. Основными легирующими элементами в этих сталях являются недорогие и доступные элементы такие как марганец, кремний, а в стали ряда марок дополнительно добавляют хром, ванадий, ниобий, титан, медь, фосфор.

Основными механизмами упрочнения строительных сталей являются: повышение плотности дислокаций; образование твердых растворов; изменение размера зерна; образование дисперсных частиц второй фазы. Степень влияния каждого из отмеченных факторов зависит от системы легирования и некоторых технологических приемов (условий нагрева при горячей обработке давлением, температуры конца последней, режима нормализации и др.).

Тем самым, в упрочнении строительных сталей в основном участвуют легирующие элементы. Поэтому, правильной системой легирования, не нарушающей требований НД, можно обеспечить требуемые механические свойства стали.



## 2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Производство зетового профиля Z310 на ПАО «ЧМК»

#### 2.1.1 Первый этап опробования производства профиля Z310

Задача первого этапа заключалась в освоении технологии производства на УРБС Прокатного цеха №3 профиля зетового для хребтовой балки Z310 с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90 в измерении фактических значений геометрических размеров, формы и качества поверхности раскатов промежуточных сечений и «лидерного» профиля. Этап был проведен в августе 2016 года.

Для проведения первого этапа опытного опробования в нагревательную печь стана были посажены 5 НЛЗ стали СтЗсп с размерами сечения 300x360 мм длиной 4000 мм, 2 НЛЗ стали 09Г2С и 2 НЛЗ стали 12Г2ФД с аналогичными размерами сечения, но длиной 8000 мм.

За период проведения опытного опробования из нагревательной печи были выданы 5 НЛЗ стали СтЗсп длиной 4000 мм и 1 НЛЗ стали 09Г2С длиной 8000 мм, но ни одна из выданных заготовок, так и не была прокатана до сечения «лидерного» профиля. Связанно это по причине наличия изгиба раскатов в горизонтальной плоскости, из-за не удержания раската при прокатке в первом калибре обжимного стана.

Химический состав опытных плавков марки 12Г2ФД приведен в таблице 2.1. Испытания механических свойств профиля Z310 в первом этапе не проводили.

Таблица 2.1- Химический состав стали 12Г2ФД опытных плавков профиля Z310

| № опытной плавки | Марка  | C    | Si   | Mn   | Al   | As    | Cr   | Cu  | N     | Ni   | P     | S     | V     | Сэкв |
|------------------|--------|------|------|------|------|-------|------|-----|-------|------|-------|-------|-------|------|
| №1               | 12Г2ФД | 0.13 | 0.25 | 1.44 | 0.03 | 0.001 | 0.07 | 0.2 | 0.006 | 0.04 | 0.015 | 0.004 | 0.048 | 0.42 |
| №2               | 12Г2ФД | 0.13 | 0.26 | 1.44 | 0.03 | 0.001 | 0.09 | 0.2 | 0.005 | 0.04 | 0.015 | 0.006 | 0.03  | 0.43 |

#### 2.1.2 Второй (повторный) этап опробования производства профиля Z310

Первый этап опытного опробования, как отмечалось выше, по результатам был неудовлетворительным в плане геометрии профиля.

Поэтому спустя несколько месяцев в декабре 2016 года было проведено повторное опробование (второй этап) производства на УРБС Прокатного цеха №3 зетового профиля для хребтовой балки Z310 с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90.

Специалисты внесли изменения в калибровку валков и привалковой арматуры, благодаря чему, появилась возможность начинать второй этап.

Для проведения опытного опробования производства в нагревательную печь стана были посажены 12 НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм, из которых вначале были посажены 5 заготовок (сталь марки А, СтЗсп, С345) длиной 4000 мм и затем 7 заготовок (сталь 09Г2С, 12Г2ФД).

В процессе прокатки первой по ходу выдачи заготовки была получена несоответствующая продукция в виде «недоката» по причине скручивания раската в пятом калибре обжимного стана.

Далее специалистами были внесены корректировки в режим обжатий, после чего, из нагревательной печи была выдана вторая заготовка и по схеме за 7 проходов прокатана в обжимном стане до сечения «лидерного» профиля. Полученный раскат был убран с линии прокатки для проведения измерений фактических значений геометрических размеров, оценки формы и качества поверхности.

По результатам измерений и осмотра было установлено несоответствие фактического значения ширины сечения профиля, а также наличие значительной серповидности и скручивания переднего конца раската.

Для устранения наличия серповидности и скручивания, специалистами было скорректировано программное обеспечение прокатки в обжимном стане – введена функция двойного захвата в заключительном седьмом проходе.

Введение и использование данной функции позволило получить достаточной прямолинейный выход из обжимного стана сечения «лидерного» профиля 9, 11 и 12 раскатов и, после удаления на пиле горячей резки головной обреза, их задачу в тандем группу УГР стана.

Однако вместе с тем, в процессе первого прохода в тандем группе УГР стана 9 и 11 раскатов произошло отключение приводов стана, по причине превышения нагрузок на гидрокапсулы эджерной клетки. Аналогичным образом, но уже в процессе второго прохода, произошло отключение приводов при прокатке заключительного 12 раската, хотя перед задачей раската в стан все зазоры по клетям стана были раскрыты.

Таким образом, в процессе повторного опробования не было получено ни одного раската готового профиля Z310 по причине наличия серповидности и скручивания переднего конца раскатов «лидерного» профиля и превышения нагрузок на гидрокапсулы тандем группы УГР стана. Поэтому на данном этапе также не проводились испытания механических свойств готового профиля, в связи с отсутствием удовлетворительного раската.

После полученных результатов опытного опробования, были сформулированы рекомендации для последующего этапа, в которых одним из пунктов оговаривалось рассмотреть возможность организации производства на УРБС профиля Z310 из исходной заготовки в виде непрерывнолитого сляба с сечением 250x640 мм.

Иными словами, можно сказать, что первые два этапа опробования производства на УРБС Прокатного цеха №3 зетового профиля Z310 для хребтовой балки проводились с целью выявления и решения «прокатных» проблем. Задача обеспечения уровня механических свойств на данных этапах, что касается металловедения, отсутствовала.

### *2.1.3 Третий этап опробования производства профиля Z310*

Как отмечалось выше, второй этап опробования производства зетового профиля Z310 для хребтовой балки был неуспешным. Причинами неудовлетворительных результатов второго этапа явилось несовершенство калибровки прокатных валков и привалковой арматуры, что стало следствием наличия серповидности и скручивания переднего конца раскатов «лидерного» профиля, а также превышения нагрузок на гидрокапсуле тандем группы УГР стана.

Для проведения опытного опробования производства 09.03.2017 в нагревательную печь УРБС были посажены 13 заготовок с размерами сечения 300x360 мм, в том числе сначала была посажена одна заготовка стали 12Г2ФД длиной 8000 мм, затем три заготовки стали С255 длиной 5200 мм и девять заготовок стали 12Г2ФД длиной 8000 мм.

После начала опробования, первая по ходу выдачи из нагревательной печи заготовка из стали 12Г2ФД была убрана с линии прокатки для проведения измерений фактических значений геометрических размеров, оценки формы и качества поверхности.

По результатам контроля было установлено соответствие геометрических размеров и качество поверхности.

Вследствие отсутствия готовности привалковой арматуры тандем группы УГР стана, дальнейшее опробование производства на данный момент времени было прекращено, а оставшиеся заготовки были выгружены из нагревательной печи в виде «возвратов».

После готовности привалковой арматуры повторное опробование производства было запланировано на 11.03.2017 и для его проведения в нагревательную печь были посажены 12 НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм, в том числе сначала были посажены 3 НЛЗ стали С255 длиной 5200 мм, затем – 9 НЛЗ стали 12Г2ФД длиной 8000 мм.

Первую по ходу выдачи из нагревательной печи заготовку из стали С255 после окончания прокатки в обжимном стане не удалось задать в тандем группу УГР стана, по причине застревания раската в проводках манипулятора клетки УК1.

После проведения соответствующих корректировок, следующая, вторая заготовка из стали С255 была прокатана по предусмотренной схеме в тандем группе УГР стана, при этом по завершению прокатки произошел выход оборудования стана из автоматического режима работы и полученный раскат был убран с линии прокатки.

Оставшаяся заготовка стали С255 была прокатана до готового профиля и передана на участок холодильника в ручном режиме оборудования.

При поступлении раската на холодильник, на пиле горячей резки, был осуществлен отбор проб от начала, середины и окончания раската для последующего определения соответствия геометрических размеров и состояния качества поверхности требованиям ГОСТ 5267.3-90, после чего раскат был порезан на длину 15 м.

Четвертая и пятая по ходу выдачи из нагревательной печи заготовки стали 12Г2ФД были прокатаны до готового профиля, и в ручном режиме работы оборудования переданы на холодильник, где аналогично предыдущему раскату, на пиле горячей резки, был осуществлён отбор проб для контроля геометрических размеров и состояния качества поверхности. После чего, раскат был порезан на длину 30 м.

Шестая заготовка была прокатана до готового профиля и после её окончания была передана в аварийный карман, в котором, ручным газокислородным резаком была порезана на длину 30 м, с отбором проб для определения соответствия геометрических размеров.

По результатам контроля фактических значений геометрических размеров, было установлено, что ни на одном из прокатанных до готового профиля раскатов, фактические значения геометрических размеров не удовлетворяют требованиям ГОСТ 5267.3-90 – меньше минимально допускаемого значения внутренняя длина большой полки.

Кроме этого, имеет место переполнение металлом на меньшей полке, с образованием дефекта типа «лампас» (рисунок 2.1).

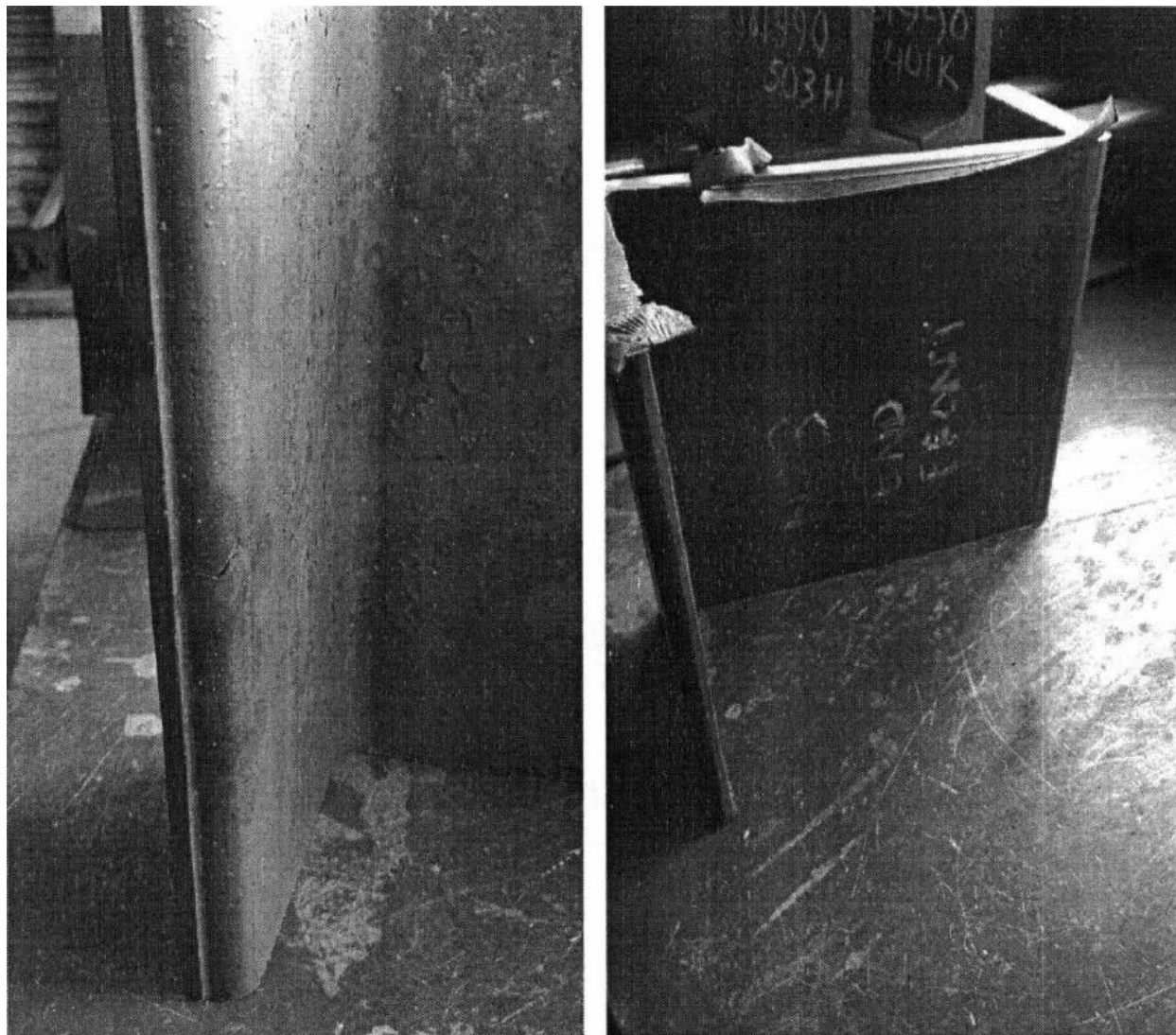


Рисунок 2.1 - Внешний вид дефекта типа «лампас»

Лампасом называют резко выраженный двусторонний ус. Ус представляет собой продольный выступ с одной стороны проката. Дефект имеет значительную протяженность и обычно распространяется на всю длину проката. Иногда дефект располагается на одном конце проката [9].

Толщина всех элементов профиля имеет максимально допустимые значения, имеет место наличие скосов (не заполнение калибров) на внешних углах в сопряжении полок и стенки.

Фактическое состояние качества поверхности раскатов также не удовлетворяет требованиям ГОСТ 5267.3-90 – имеются дефекты поверхности типа «вмятины», «рванины» и «плены» не допускаемой глубины залегания.

В результате обсуждения полученных результатов со специалистами и невозможностью внесения соответствующих измерений в схему прокатки и режимы обжати, было принято решение о прекращении опытного опробования и выгрузке из нагревательной печи «возвратами» оставшихся 6 НЛЗ марки 12Г2ФД.

В процессе проведения опытного опробования специалистами ЦЭСТ осуществлялся пирометрический контроль значений температуры поверхности раскатов после окончания прокатки в обжимной стане и после второго прохода в тендеме группы УГР стана. Результаты контроля приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Температура поверхности раската профиля Z310

| Время измерений                  | Марка стали | Температура поверхности раската, С° |                           | Примечание |
|----------------------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------|------------|
|                                  |             | Перед 1-ым проходом УГР             | После 2-го прохода УГР    |            |
| 7:40                             | Ст3пс       | 1070                                | -                         | недокат    |
| 7:56                             | Ст3пс       | 1091                                | -                         | недокат    |
| 8:40                             | Ст3пс       | 1096                                | 1002                      |            |
| 11:05                            | 12Г2ФД      | 1097                                | 1007/960 <sup>прим</sup>  |            |
| 11:30                            | 12Г2ФД      | 1108                                | 1021/987 <sup>прим</sup>  |            |
| 11:43                            | 12Г2ФД      | 1107                                | 1032/1012 <sup>прим</sup> |            |
| Примечание – первичная/последняя |             |                                     |                           |            |

Для проведения испытаний механических свойств от двух раскатов был проведен отбор четырех полнопрофильных проб.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.3 из которой видно, что механические свойства зетового профиля Z310 для хребтовой балки из стали 12Г2ФД соответствуют уровню свойств для категории 1-15 класса прочности 345 и 355 по ГОСТ 19281-2014, а классу прочности 375 соответствует на нижнем пределе.

Можно сделать вывод, что результаты испытаний механических свойств зетового профиля Z310 для хребтовой балки из стали марки С255 соответствуют ГОСТ 27772-2015 категориям 1-7 классу прочности 255 (см. таблицу 2.3).

По таблице 2.4 видно, что химический состав плавок, прокатанных в рамках 3 этапа, соответствует требованиям НД.

Таблица 2.3 – Результаты испытаний механических свойств зетового профиля Z310 для хребтовой балки

| Марка                                                   | $\sigma_B$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> | $\delta$ ,<br>% | KCU<br>0°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-20°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-40°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-60°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-70°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCV<br>0°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCV<br>-20°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCV<br>-40°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCV<br>-60°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCV<br>-70°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | Мех.<br>стар.,<br>Дж/см <sup>2</sup> |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Требования<br>НД*                                       | 510                               | 375                               | 21              | -                                 | 29                                  | 29                                  | -                                   | -                                   | -                                 | -                                   | -                                   | -                                   | -                                   | 29                                   |
| 12Г2ФД                                                  | 510                               | 375                               | 30              | 268                               | 263                                 | 215                                 | 203                                 | 200                                 | 215                               | 213                                 | 163                                 | 103                                 | 118                                 | 245                                  |
|                                                         | 550                               | 400                               | 26              | 283                               | 243                                 | 255                                 | 193                                 | 215                                 | 268                               | 218                                 | 160                                 | 98                                  | 218                                 | 250                                  |
| С255                                                    | 430                               | 300                               | 30              | 193                               | 140                                 | 137,5                               | 122,5                               | 130                                 | 138                               | 128                                 | 85                                  | 80                                  | -                                   | -                                    |
|                                                         | -                                 | -                                 | -               | 175                               | 138                                 | 140                                 | 120                                 | 135                                 | 170                               | 105                                 | 95                                  | 30                                  | -                                   | -                                    |
| Примечание - ГОСТ 19281-2014 (для класса прочности 375) |                                   |                                   |                 |                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                      |

Таблица 2.4 – Химический состав плавок, прокатанных в рамках 3 этапа

| Плавка                     | Марка  | НТД                | C                | Mn              | Si            | Al            | Cr               | Ni    | Cu            | P                 | S                 | V             |
|----------------------------|--------|--------------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|-------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Требования ГОСТ 19281-2014 |        |                    | 0,09-<br>0,015   | 1,3-1,7         | 0,17-<br>0,37 | н.б.<br>0,5   | не более<br>0,30 |       | 0,15-<br>0,30 | не более<br>0,030 | не более<br>0,035 | 0,02-<br>0,10 |
| Требования ГОСТ 27772-2015 |        |                    | не более<br>0,17 | не более<br>1,0 | 0,15-<br>0,30 | 0,02-<br>0,05 | не более 0,30    |       |               | не более<br>0,035 | не более<br>0,025 | -             |
| 4                          | 12Г2ФД | ГОСТ<br>19281-2014 | 0,131            | 1,44            | 0,26          | 0,03          | 0,086            | 0,04  | 0,21          | 0,015             | 0,0063            | 0,03          |
| 5                          | 12Г2ФД | ГОСТ<br>19281-2014 | 0,124            | 1,44            | 0,25          | 0,025         | 0,076            | 0,039 | 0,23          | 0,019             | 0,005             | 0,085         |
| 6                          | С255   | ГОСТ<br>27772-2015 | 0,154            | 0,473           | 0,23          | 0,021         | 0,038            | 0,018 | 0,007         | 0,032             | 0,0043            | -             |

По результатам третьего этапа опытного опробования производства на УРБС зетового профиля Z310 для хребтовой балки можно сделать вывод, что даже при попадании в пределы по химическому составу по ГОСТ 19281-2014 для марки 12Г2ФД, уровень механических свойств соответствовал классу прочности 345 и 355, а классу прочности 375 - соответствовал на нижнем допуске. Возможная причина пониженного уровня механических свойств заключалась в низком содержании Mn. Поэтому для следующего этапа были даны рекомендации, в которых было сказано, что для обеспечения в профиле Z310 из марки стали 12Г2ФД по ГОСТ 19281 класса прочности 375, нужно опробовать суженные пределы по химическому составу: для С 0,13-0,14%, для Mn – 1,45-1,6%.

#### *2.1.4 Четвертый этап опробования производства профиля Z310*

По результатам неудовлетворительного третьего этапа опробования производства профиля зетового для хребтовой балки Z310 с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90, состоявшегося на УРБС в период с 09.03-11.03.2017 г, специалистами в очередной раз была скорректирована калибровка прокатных валков и привалковая арматура.

Необходимо отметить, что по результатам подготовки прокатных клетей к прокатке, было установлено несоответствие поставленной (скорректированной) в адрес «ЧМК» привалковой арматуры по геометрическим её размерам, вследствие чего, в очередной раз пришлось её «подгонять».

Для проведения опытного опробования в нагревательную печь УРБС были посажены 12 НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм, в том числе 2 НЛЗ стали СтЗсп, предназначенные для «прожига калибров», и 10 НЛЗ стали 12Г2ФД двух плавов: Плавка №4 (9 НЛЗ) и Плавка №5 (1 НЛЗ) из числа «возвратов» от предыдущего этапа опробования.

Первая по ходу выдачи из нагревательной печи заготовка стали стЗсп была прокатана по предусмотренной схеме и режиму обжатий в обжимном стане до сечения «лидерного» профиля, после чего, полученный раскат для проведения измерений и оценки формы был убран с линии прокатки.

Следующая по ходу выдачи из нагревательной печи заготовка стали стЗсп была прокатана до готового профиля Z310.

По результатам контроля геометрических размеров профиля на пробе, отобранной от поступившего раската на пиле горячей резки № 2, было установлено несоответствие параметра профиля «сварочная полка» - фактическое значение составило 163,5 мм при требуемом ГОСТ 5267.3-90 значении  $174,0 \pm 3$  мм.

Необходимо отметить, что данное несоответствие имело место и на предыдущем, третьем этапе опытного опробования производства.

На следующем, третьем раскате (первая НЛЗ из стали 12Г2ФД) при его прокатке в тандем группе УГР стана была получена несоответствующая в виде «недоката» - не смогли задать, т.к. после второго прохода имело место значительное искривление раската в обеих плоскостях («серповидность» и «лыжа»).

После проведения специалистами корректировок режимов обжатий в обжимном стане и тандем группе УГР стана следующие заготовки (четвёртая и пятая по ходу выдачи) стали 12Г2ФД были прокатаны до готового профиля Z310.

И вновь по результатам контроля фактических значений геометрических размеров на пробах, отобранных от раскатов на пилах горячей резки, было установлено несоответствие заданным требованиям (меньше на 8-10 мм) параметра «сварочная полка», остальные параметры профиля соответствовали заданным требованиям.

Перед выдачей из нагревательной печи следующей, шестой заготовки для увеличения длины параметра «сварочная полка» на 5 мм в сторону привода была смещена входная привалковая арматура первого калибра эджерной клетки тандем группы УГР стана.

По результатам контроля пробы, отобранной от прокатанного до готового профиля Z310 шестого раската, вновь было установлено несоответствие параметра «сварочная полка» - фактическое значение 164,3 мм.

После очередной корректировки режима обжатий, прокатки до готового профиля Z310 седьмой заготовки и контроля геометрических размеров и в данном случае было установлено несоответствие (168,5 мм) параметра «сварочная полка».

В очередной раз специалистами была предпринята попытка обеспечить требуемое значение параметра «сварочная полка» за счёт внесения корректировок в привалковую арматуру и режимов обжатий.

Так, перед выдачей из нагревательной печи восьмой заготовки на входную привалковую арматуру первого калибра клетки УК1 тандем группы УГР стана была наварена пластина размером порядка 200 x 300 x 3 мм и скорректирован режим обжатия в тандем группе УГР стана.

Тем не менее, по результатам прокатки оставшихся в нагревательной печи четырёх заготовок и контроля геометрических размеров готового профиля Z310 достичь требуемого значения параметра «сварочная полка» не удалось.

Таким образом, и результаты четвёртого этапа опытного опробования производства на УРБС профиля зетового для хребтовой балки Z310 с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90 были признаны неудовлетворительными, вследствие не достижения соответствующих требованиям ГОСТ 5267.3-90.

Полученные 10 раскатов профиля Z310, в том числе, один раскат из стали СтЗсп и девять раскатов из стали 12Г2ФД были порезаны на единицы длиной порядка 15 м и складированы до особого распоряжения.

Таким образом, четвертый этап был проведен с целью получения правильной формы геометрии профиля в соответствии с требованиями ГОСТ 5267.3-90, поэтому контроль механических свойств полученных готовых профилей не проводился.



### 2.1.5 Пятый этап опробования производства профиля Z310

По результатам неудовлетворительного четвертого этапа опробования производства профиля зетового для хребтовой балки Z310 с техническими требованиями по ГОСТ 5267.3-90, состоявшегося на УРБС 31.05.2017 г, специалистами в очередной раз была скорректирована калибровка прокатных валков и модифицирована привалковая арматура.

Для проведения опытной прокатки в нагревательную печь УРБС были посажены 12 НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм, в том числе 2 НЛЗ стали С255 для «прожига калибров» и оценки сечения «лидерного» профиля, и 10 НЛЗ стали 12Г2ФД плавки №7. Первая по ходу выдачи из нагревательной печи заготовка стали С255 была прокатана в обжимном стане по схеме за 7 проходов до сечения «лидерного» профиля, после чего, полученный раскат был убран с линии стана для проведения измерений и оценки формы.

Следующая заготовка стали С255 была прокатана в обжимном стане до сечения «лидерного» профиля и передана для дальнейшей прокатки в тандем группе УГР стана (удаление обреза на пиле горячей резки № 1 технологией не предусмотрено), однако, задать раскат не удалось – «застрял» в привалковой арматуре клетки УК1, был получен «недокат».

При прокатке третьей по ходу выдачи заготовки (сталь 12Г2ФД), в третьем проходе в клетки УК2 тандем группы УГР стана был получен «забой», раскат ударился в верхнюю вводную проводку клетки.

Причиной получения «забоя» стало несовершенство привалковой арматуры универсальных клеток, а именно отсутствие, так называемых «воронок-ловушек», не позволяющих в случае изгиба раскатов утыкаться в торец привалковой арматуры.

В результате «забоя» были повреждены три подушки подшипников, в том числе две нижние клетки УК1 и одна нижняя (со стороны привода) эджерной клетки, а также были повреждены три проводки.

По окончании устранения последствий «забоя» (продолжительность простоя стана составила 18 ч) опытная прокатка была возобновлена.

Все оставшиеся в нагревательной печи 9 НЛЗ стали 12Г2ФД были прокатаны до готового профиля Z310.

При контроле геометрических параметров сечения профиля на пробах, отобранных на пилах горячей резки № 2 и № 3 с головной, хвостовой и из средней части каждого раската, было установлено, что ни в одном из случаев, в полном объеме геометрические параметры сечения профиля достигнуты не были.

Имело место не заполнение металлом угла сопряжения опорной полки со стенкой профиля (рисунок 2.2), соответственно регламентированные ГОСТ 5267.3-90 параметры: «притупление прямых углов» и «скос прямого угла по полке» были несоответствующими.



Рисунок 2.2 – Внешний вид несоответствия «притупления прямых углов» и «скоса прямого угла по полке», вследствие не заполнения металлом.

Кроме этого, из-за наличия в процессе прокатки периодического переполнения металлом калибров, на сварной полке профиля имело место наличие дефекта поверхности типа «ус» (рисунок 2.3) и несоответствии параметра «длина сварной полки».



Рисунок 2.3 – Дефект поверхности типа «ус» на торце сварной полки.

Необходимо отметить, что по результатам прокатки каждого раската и контроля проб специалистами вносились корректировки в режим обжатий, тем не менее, положительных результатов получено не было.

После окончания охлаждения на холодильнике осуществлялась отработка режимов правки в горизонтальной правильной машине, по результатам которой, удалось настроить режим правки обеспечивающий требуемые значения отклонений от прямолинейности.

При визуальном осмотре фактического состояния качества поверхности на всех единицах продукции, с внутренней стороны сварной полки имело место наличие дефекта поверхности типа «риска» глубиной залегания до 0,19 мм и шириной до 50 мм, а также на торце сварной полки всех единиц продукции наличие дефекта поверхности типа «ус».

Остальные геометрические параметры сечения профиля и отклонения от прямолинейности на всех единицах продукции соответствовали требованиям ГОСТ 5267.3-90.

Механические свойства на пятом этапе представлены в таблице 2.5. Химический состав опытных плавок приведен в таблице 2.6.

На основании вышеизложенного и результаты пятого этапа опытного опробования производства на УРБС профиля зетового для хребтовой балки Z310 были признаны неудовлетворительными. Поэтому было решено опробовать прокатку профиля Z310 из НЛС сечением 250x770 мм.

### *2.1.6 Опробования производства профиля Z310 из НЛС*

После проведении пятого этапа, все полученные единицы продукции профиля Z310 не соответствовали требованиям ГОСТ 5267.3-90 по параметрам сечения профиля: «скос прямого угла по опорной полке и стенке» и «притупление прямого угла с опорной полкой».

Кроме этого, на торце сварной полки всех единиц продукции имело место наличие дефекта поверхности прокатного происхождения типа «ус».

В этой связи, было принято решение о необходимости корректировки калибровки валков собственными силами и проведении опробования производства профиля Z310 из НЛС с размерами сечения 250x770 мм.

Для проведения опробования в нагревательную печь УРБС были посажены 7 НЛС с размерами сечения 250x770 мм стали 09Г2С двух плавок №8 (2 НЛС) и №9 (5 НЛС) и 2 НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм стали 12Г2ФД плавки №7.

Необходимо отметить, что на всех НЛС с размерами сечения 250x770 мм, назначенных для опробования производства, имело место наличие на широкой грани дефекта типа «кристаллизационная трещина» (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Внешний вид НЛС с размерами сечения 250x770 мм с наличием дефекта типа «кристаллизационная трещина»

Таблица 2.5 – Результаты испытаний механических свойств зетового профиля Z310 для хребтовой балки

| Плавка | Марка      | Номер образца | $\sigma_B$ , н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , н/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | KCU<br>-60°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-40°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | KCU<br>-70°C,<br>Дж/см <sup>2</sup> | Мех.<br>стар.,<br>Дж/см <sup>2</sup> |
|--------|------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| № 4    | 375-12Г2ФД | 1.1           | 580                            | 400                            | 21           | 31                                  | 106                                 | 28                                  | 293                                  |
|        |            | 1.2           |                                |                                |              | 10                                  | 66                                  | 9                                   | 374                                  |
|        |            | 2.1           | 590                            | 415                            | 20           | 29                                  | 100                                 | 29                                  | 288                                  |
|        |            | 2.2           |                                |                                |              | 11                                  | 75                                  | 10                                  | 356                                  |
| № 5    | 375-12Г2ФД | 1.1           | 590                            | 410                            | 22           | 135                                 | 18                                  | 85                                  | 264                                  |
|        |            | 1.2           |                                |                                |              | 119                                 | 20                                  | 75                                  | 250                                  |
|        |            | 2.1           | 580                            | 410                            | 20           | 66                                  | 19                                  | 41                                  | 179                                  |
|        |            | 2.2           |                                |                                |              | 74                                  | 24                                  | 50                                  | 188                                  |
|        |            | 3.1           | 570                            | 445                            | 20           | 119                                 | 88                                  | 48                                  | 193                                  |
|        |            | 3.2           |                                |                                |              | 119                                 | 85                                  | 53                                  | 196                                  |
|        |            | 4.1           | 600                            | 485                            | 21           | 79                                  | 38                                  | 34                                  | 181                                  |
|        |            | 4.2           |                                |                                |              | 88                                  | 50                                  | 45                                  | 188                                  |

Таблица 2.6 – Химический состав плавок, прокатанных в рамках 5 этапа

| Плавка                     | Марка  | C          | Mn      | Si        | Al           | Cr            | Ni   | Cu        | P              | S              | V         |
|----------------------------|--------|------------|---------|-----------|--------------|---------------|------|-----------|----------------|----------------|-----------|
| Требования ГОСТ 19281-2014 |        | 0,09-0,015 | 1,3-1,7 | 0,17-0,37 | не более 0,5 | не более 0,30 |      | 0,15-0,30 | не более 0,030 | не более 0,035 | 0,02-0,10 |
| №4                         | 12Г2ФД | 0,13       | 1,44    | 0,25      | 0,03         | 0,07          | 0,04 | 0,20      | 0,015          | 0,004          | 0,048     |
| №5                         | 12Г2ФД | 0,124      | 1,56    | 0,25      | 0,03         | 0,08          | 0,04 | 0,23      | 0,019          | 0,005          | 0,086     |

Нагрев НЛС и НЛЗ в нагревательной печи УРБС осуществлялся до температуры 1310 - 1320 °С, фактический режим нагрева приведён в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Режим нагрева НЛС в нагревательной печи УРБС

| Номер плавки | Сечение заготовки | Среднее значение температуры, °С |                  |                  |               | Расчётная температура выдачи, °С | Продолжительность нагрева, ч |
|--------------|-------------------|----------------------------------|------------------|------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|
|              |                   | Предварительная зона             | Зона нагрева № 1 | Зона нагрева № 2 | Зона томления |                                  |                              |
| №9           | 250x770           | 1090                             | 1277             | 1289             | 1296          | 1342                             | 4.4                          |
| №9           | 250x770           | 1091                             | 1277             | 1298             | 1296          | 1343                             | 4.9                          |
| №8           | 250x770           | 1091                             | 1282             | 1307             | 1297          | 1347                             | 5.7                          |
| №9           | 250x770           | 1091                             | 1285             | 1305             | 1298          | 1343                             | 7.7                          |
| №9           | 250x770           | 1094                             | 1289             | 1306             | 1298          | 1338                             | 7.9                          |
| №8           | 250x770           | 1096                             | 1285             | 1304             | 1295          | 1338                             | 8.1                          |
| №9           | 250x770           | 1096                             | 1256             | 1304             | 1296          | 1340                             | 8.5                          |
| №7           | 300x360           | 1097                             | 1251             | 1305             | 1293          | 1337                             | 8.6                          |
| №7           | 300x360           | 1100                             | 1249             | 1303             | 1293          | 1339                             | 8.9                          |

После выдачи из нагревательной печи НЛС с размерами сечения 250x770 мм подвергались прокатке на блюминге по схеме за 11 проходов до сечения 200x465 мм, после чего, раскаты «с одного нагрева» передавались для дальнейшей прокатки на УРБС.

Продолжительность прокатки на блюминге одного сляба составляла 110 с. Фактическая температура поступления к обжимному стану УРБС раскатов промежуточного сечения 200x465 мм составляла 1070-1073 °С, заготовок с размерами сечения 300x360 мм – 1060 °С.

До готового профиля Z310 были прокатаны 5 НЛС и 2 НЛЗ.

Один «недокат» (первый по ходу опробования) был получен целенаправленно, после окончания прокатки в обжимном стане, для контроля геометрических размеров поперечного сечения «лидерного» профиля, второй – после первого прохода в тандем группе УГР стана, по причине «ухода» капсулы вертикального вала клетки УК2.

Сечение «лидерного» профиля соответствовало необходимым требованиям.

От каждого раската на пилах горячей резки № 2 и № 3 удалялась концевая обрезь, порядка 3 м с каждого конца, после чего, отбирались пробы, в том числе и из середины раскатов, для контроля геометрических размеров поперечного сечения профиля.

По результатам контроля на каждом раскате установлено наличие переполнения калибров металлом – наличие дефекта прокатного происхождения типа «ус» на сварной и опорной полке профиля Z310 (рисунок 2.5), который в дальнейшем подвергался зачистке по всей длине единиц продукции.



Рисунок 2.5 – Наличие переполнения калибров металлом («ус») на сварной и опорной полке профиля Z310.

Кроме этого, имело место несоответствие контролируемого параметра сечения профиля «притупление угла» в месте сопряжения стенки и опорной полки профиля.

Необходимо отметить, что вышеуказанные несоответствия были идентичны как для раскатов, прокатанных из НЛС с размерами сечения 250x770 мм, так и для раскатов, прокатанных из НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм, что свидетельствует о принципиальной возможности использования, при производственной необходимости, того и другого типа исходных заготовок.

Имеющие место несоответствия устранить за счёт корректировок режимов обжатий на блюминге и УРБС не представилось возможным, только за счёт корректировки калибровки валков обжимного стана и тандем группы УГР.

Правка раскатов в горизонтальной правильной машине осуществлялась по режиму, отработанному на предыдущей стадии опытного опробования производства.

Порезка раскатов на пилах холодной резки осуществлялась на единицы продукции длиной 13000 мм.

В таблице 2.8 приведены результаты испытаний механических свойств, из которых видно, что они соответствуют требованиям ГОСТ 5267.0-90.

Таблица 2.8 – Результаты испытаний механических свойств профиля Z310

| Плавка                                         | Марка  | $\sigma_B$ ,<br>н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ ,<br>н/мм <sup>2</sup> | $\delta$ ,<br>% | КСУ<br>-60°С,<br>Дж/см <sup>2</sup> | КСУ<br>-40°С,<br>Дж/см <sup>2</sup> | КСУ<br>-70°С,<br>Дж/см <sup>2</sup> | Мех.<br>стар.,<br>Дж/см <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Требования ГОСТ 19281 для класса прочности 375 |        | 510                               | 375                               | 21              | -                                   | 29                                  | -                                   | 29                                   |
| Требования ГОСТ 19281 для класса прочности 345 |        | 480                               | 345                               | 21              | -                                   | 29                                  | -                                   | 29                                   |
| №7                                             | 12Г2ФД | 560                               | 450                               | 34              | 212                                 | 223                                 | 135                                 | 310                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 212                                 | 226                                 | 143                                 | 312                                  |
|                                                |        | 545                               | 435                               | 35              | 210                                 | 227                                 | 138                                 | 315                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 208                                 | 230                                 | 137                                 | 317                                  |
| №8                                             | 09Г2С  | 525                               | 415                               | 35              | 212                                 | 225                                 | 142                                 | 307                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 213                                 | 222                                 | 132                                 | 320                                  |
|                                                |        | 530                               | 430                               | 35              | 205                                 | 218                                 | 127                                 | 327                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 207                                 | 222                                 | 140                                 | 317                                  |
| №9                                             | 09Г2С  | 505                               | 410                               | 35              | 206                                 | 217                                 | 138                                 | 322                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 202                                 | 213                                 | 137                                 | 333                                  |
|                                                |        | 515                               | 415                               | 35              | 205                                 | 213                                 | 137                                 | 333                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 200                                 | 210                                 | 140                                 | 338                                  |
|                                                |        | 515                               | 410                               | 36              | 197                                 | 210                                 | 141                                 | 328                                  |
|                                                |        |                                   |                                   |                 | 202                                 | 223                                 | 135                                 | 315                                  |

По результатам данного этапа были сделаны следующие выводы:

1. Проведено опробование производства профиля Z310 по скорректированному специалистами «ЧМК» варианту калибровки валков, с использованием в качестве исходных заготовок НЛС с размерами сечения 250x770 мм и промежуточной их прокаткой на блюминге, а также заготовок сечением 300x360 мм.

2. Продолжительность промежуточной прокатки на блюминге одного НЛС по схеме за 11 проходов составляет 110 с.

Температура поступления к обжимному стану раскатов с промежуточной прокаткой на блюминге составляла 1070-1073 °С, заготовок с размерами сечения 300x360 мм – 1060 °С, при нагреве в печи УРБС обоих типов заготовок до 1320 °С.

3. По результатам оперативного (на пробах, отобранных на пилах горячей резки) и сдаточного контроля установлено наличие на всех единицах продукции профиля Z310 перепополнения калибров металлом («ус» на сварной и опорной полке) и за исключением 6 единиц продукции несоответствие параметра сечения профиля «притупление угла», в месте сопряжения стенки и опорной полки профиля.

4. Устранить имеющие место несоответствия представляется возможным только за счёт корректировки калибровки валков обжимного стана и тандем группы УГР стана.

5. Установлена принципиальная возможность организации производства профиля Z310 из НЛС с размерами сечения 250x770 мм, с промежуточной их прокаткой на блюминге, и из НЛЗ с размерами сечения 300x360 мм.



Имеющие место несоответствия по геометрическим параметрам сечения профиля и наличию переполнения металлом идентичны для обоих типов заготовок.

6. По результатам контроля и зачистки по всей длине дефекта поверхности типа «ус» 6 единиц продукции плавки №5 стали 12Г2ФД мерной длиной 13000 мм признаны соответствующими по геометрическим размерам сечения и кривизне требованиям ГОСТ 5267.3-90.

7. Результаты испытаний механических свойств показали соответствие требованиям ГОСТ 5267.0-90.

### *2.1.7 Дальнейшее производство зетового профиля Z310*

После проведения всех пробных этапов опробования производства зетового профиля на УРБС проводили дальнейшие мероприятия для устранения проблем, которые не были устранены ранее. Эти проблемы были связаны в основном с геометрией профиля и износом прокатного оборудования.

Выделим основные результаты, полученные после проведения всех таких работ:

1. Корректировка калибровки валков обжимного стана и тандем группы УГР стана позволила предупредить образование на сварной полке дефекта формы типа «ус» и соответственно обеспечить её ширину, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 5267.3-90.

2. Вместе с тем, в течение прокатки не удалось устойчиво обеспечить соответствие параметра «притупление прямого угла» в месте сопряжения стенки профиля и опорной полки, в том числе, из-за несовершенства привалковой арматуры тандем группы стана и повышенного её износа.

3. Для обеспечения соответствия данного параметра требовалась очередная корректировка калибровки всех клетей стана, внесение дополнительных изменений в конструктив арматуры чистового калибра клетки УК2. Данный пункт по сей день дорабатывается.

4. Результаты испытаний механических свойств показывали своё соответствие установленным требованиям, предусмотренным для классов прочности 375 и 390.

Таким образом, со временем удалось устранить важные проблемы при производстве зетового профиля Z310. Однако на основании выводов было принято решение отгружать данный профиль потребителю в ограниченном объеме в связи с износом привалковой арматуры тандем группы стана. После также проводились работы по корректировке калибровки всех клетей стана и пр.

Получить стабильные механические свойства, соответствующие классу прочности 440 после всех этапов опробования производства, не удалось. Поэтому с помощью множественной линейной регрессии была опробована возможность повышения механических свойств зетового профиля Z310 из стали 12Г2ФД, о чем посвящены следующие разделы.



## 2.2 Проведение опыта

На ПАО «ЧМК» зетовый профиль Z310 поставляют в горячекатаном состоянии из стали марок 09Г2С классом прочности 345 и 375 и 12Г2ФД классом прочности 375 и 390 в соответствии с требованиями ГОСТ 19281-2014 и ГОСТ 5267.3-90. Данный профиль можно относить к «тяжелым» профилям, так как толщина тонкой (сварной) и толстой (опорной) полок составляет 13 и 20,5 мм, соответственно. При такой толщине профиля в горячекатаном состоянии сталь марки 09Г2С не гарантирует стабильное обеспечение класса прочности 390 и выше. Поэтому данную марку не рассматривали в проведенной работе, а для изучения была выбрана сталь марки 12Г2ФД.

Требования ГОСТ 19281-2014 норм механических свойств при испытании на растяжение представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Требования норм механических свойств при испытании на растяжение зетового профиля Z310 по ГОСТ 19281-2014 для стали марки 12Г2ФД

| Класс прочности | $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|
| 390             | 530                            | 390                            | 19           |
| 440             | 590                            | 440                            | 19           |

Требования ГОСТ 19281-2014 по химическому составу указаны в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Требования по химическому составу для марки стали 12Г2ФД по ГОСТ 19281-2014

| Марка стали | C           | Mn        | Si          | P              | S              | Cu          | Cr            | V           | Ni            |
|-------------|-------------|-----------|-------------|----------------|----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
|             | Масс, %     |           |             |                |                |             |               |             |               |
| 12Г2ФД      | 0,09 - 0,15 | 1,3 - 1,7 | 0,17 - 0,37 | не более 0,030 | не более 0,035 | 0,15 - 0,30 | не более 0,30 | 0,02 - 0,10 | не более 0,30 |

### 2.2.1 Отбор проб на испытания механических свойств

Отбор образцов на механические испытания от профиля выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 7564-97 [11]. Схема отбора образцов от профиля изображена на рисунке 2.6. Отбор проб и заготовок производится в объеме согласно таблице 2.10

Образцы на растяжение вырезают из «толстой» опорной полки, а образцы на ударный изгиб из «тонкой» сварной полки.

Следует отметить особенность отбора проб профиля Z310 по сравнению с остальными фасонными профилями. Для большинства профилей фасонного проката (двутавры, швеллеры и т.д.) образцы для испытаний на растяжение и на ударный изгиб вырезают, как правило, из одного элемента профиля, имеющего наибольшую толщину. В зетовом профиле Z310 образцы для испытаний на растяжение также вырезают из «толстой» полки, а на ударный изгиб из «тонкой» сварной полки.

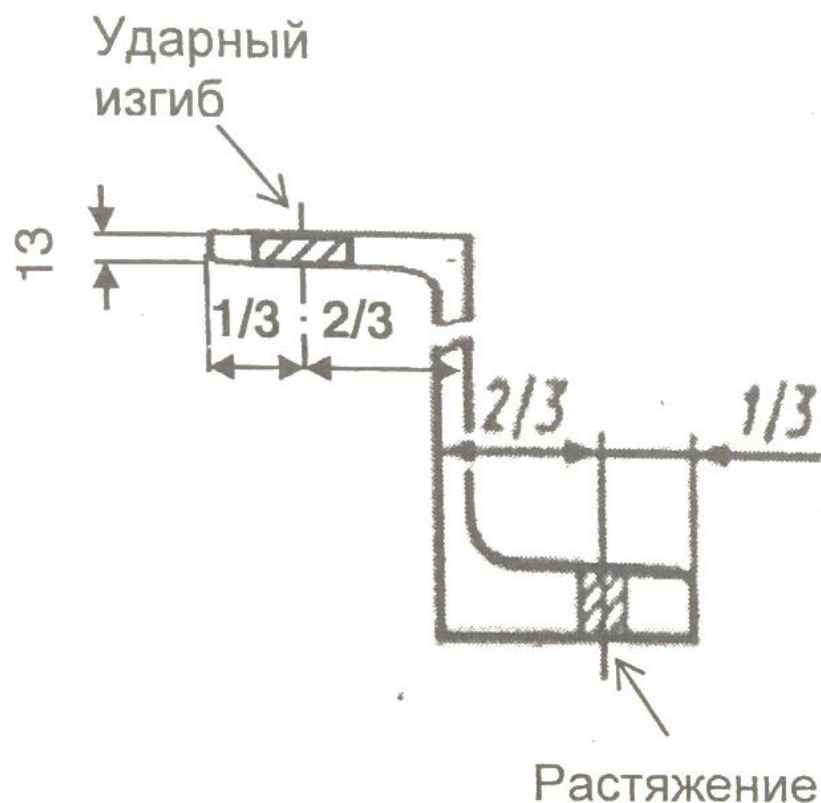


Рисунок 2.6 – Схема отбора заготовок на испытания механических свойств

Таблица 2.10 – Объем количества проб и образцов для механических испытаний

| Наименование фасонного проката                        | Механические испытания                                               |                                     |                                                      |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                       | Количество штанг от плавки, шт / количество проб от одной штанги, шт | Вид испытаний б                     |                                                      |
|                                                       |                                                                      | 63                                  |                                                      |
|                                                       |                                                                      | Растяжение                          | Ударный изгиб                                        |
|                                                       |                                                                      | количество заготовок из 1 пробы, шт |                                                      |
| Профиль зетовый для хребтовой балки по ГОСТ 5267.3-90 | 2/1                                                                  | 1                                   | 1 (на 6 образцов) – по 2 образца на 3 вида испытаний |

### 2.2.2 Анализ диаграммы переохлажденного аустенита

Диаграмма распада переохлажденного аустенита для стали 12Г2ФД в литературе отсутствует, поэтому были приведены близкие по химическому составу диаграммы для стали 09Г2ФБ и 12Г2ФР [10], которые представлены на рисунках 2.7 и 2.8, соответственно.

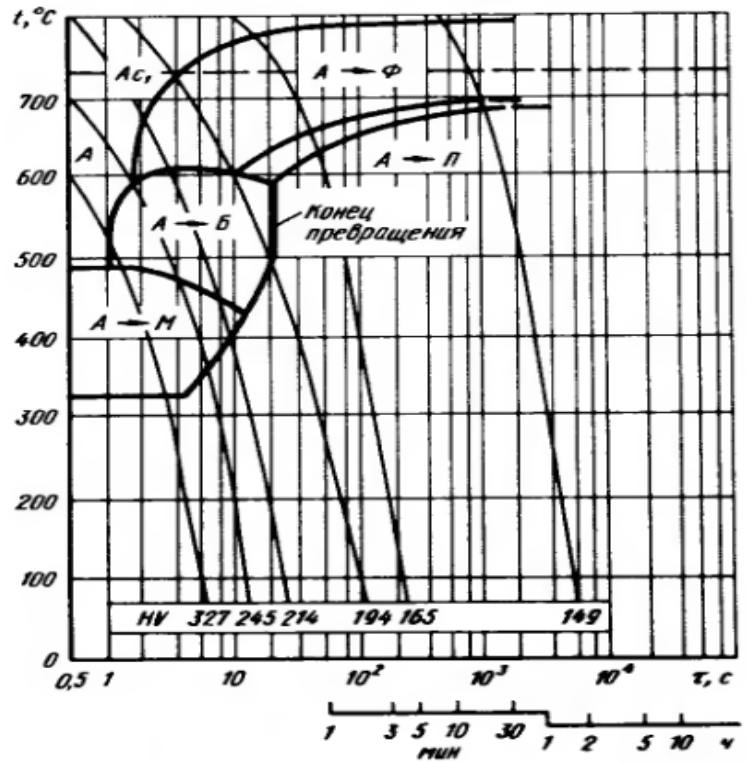


Рисунок 2.7 – Диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 09Г2ФБ

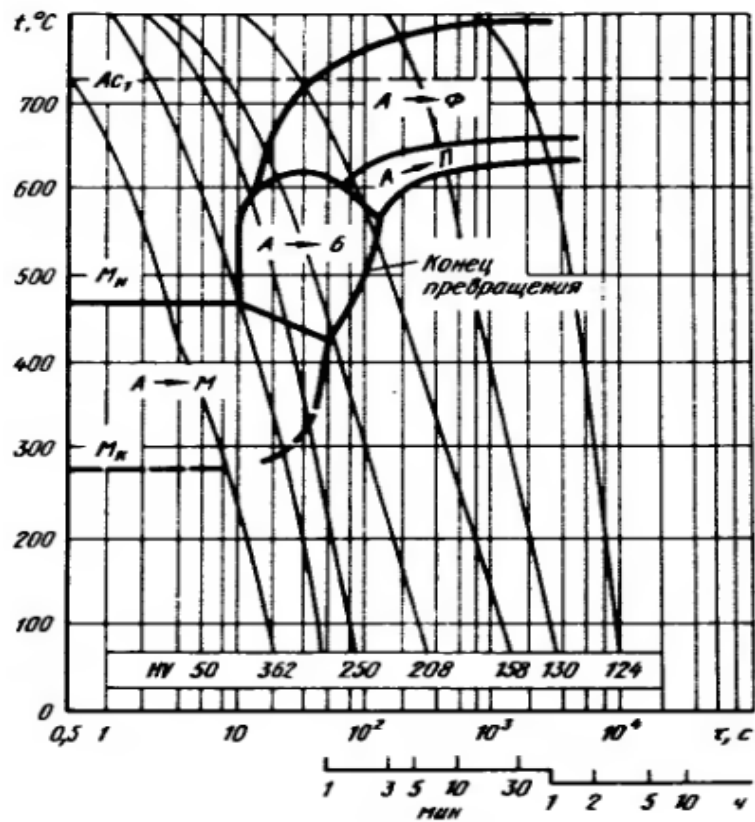


Рисунок 2.8 – Диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 12Г2ФР

Выбор данных диаграмм для марок сталей 09Г2ФБ и 12Г2ФР обусловлен близким содержанием углерода и легирующих элементов к исследуемой стали марки 12Г2ФД. Так, например, в первом случае, содержание углерода меньше, чем в исследуемой марке стали, но попадает в нормы требований ГОСТ 19281-2014 для марки стали 12Г2ФД по химическому составу. Главное отличие заключается в наличии карбидообразующего элемента – ниобия, вместо некарбидообразующей меди. Медь растворяется в твердом растворе феррита, а ниобий участвует в образовании дисперсионных выделений, которые затрудняют рост зерна. Во втором случае, сталь марки 12Г2ФР отличается от стали марки 12Г2ФД наличием бора вместо меди. Бор сильно влияет на прокаливаемость, поэтому «с-кривая» сильнее смещена вправо (см. рисунок 2.7).

### 2.2.3 Изучение микроструктуры

Для изучения микроструктуры был вырезан поперечный шлиф с опорной полки профиля от одной из последней производственно-промышленной плавки. Микроструктура стали изучалась на шлифе после травления в 4 %-ной азотной кислоте в этиловом спирте. Структура представлена на рисунках 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 и 2.14.

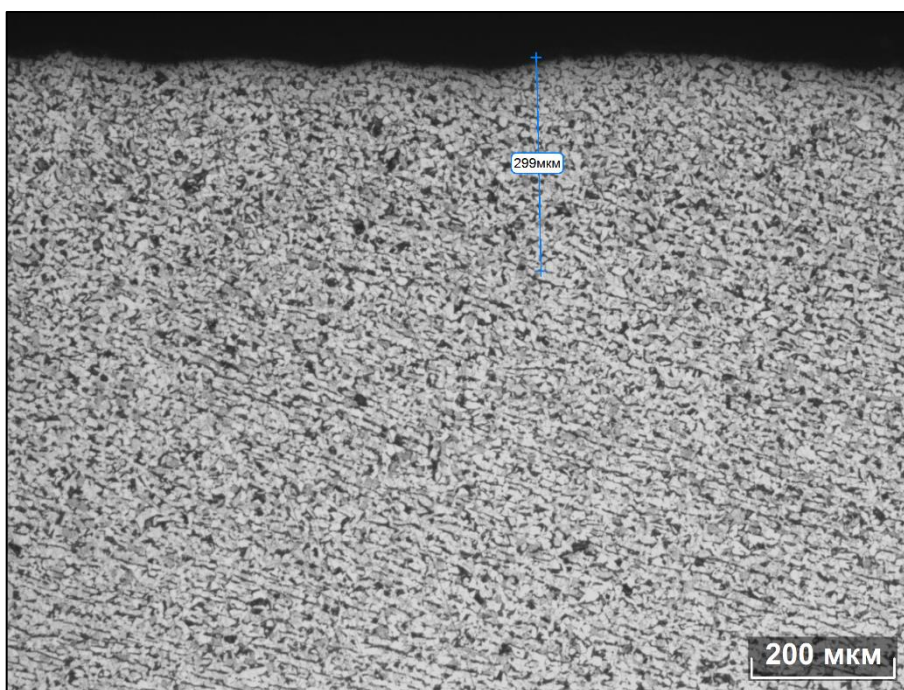


Рисунок 2.9 – Микроструктура с краю от поверхности. Верхняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, х50



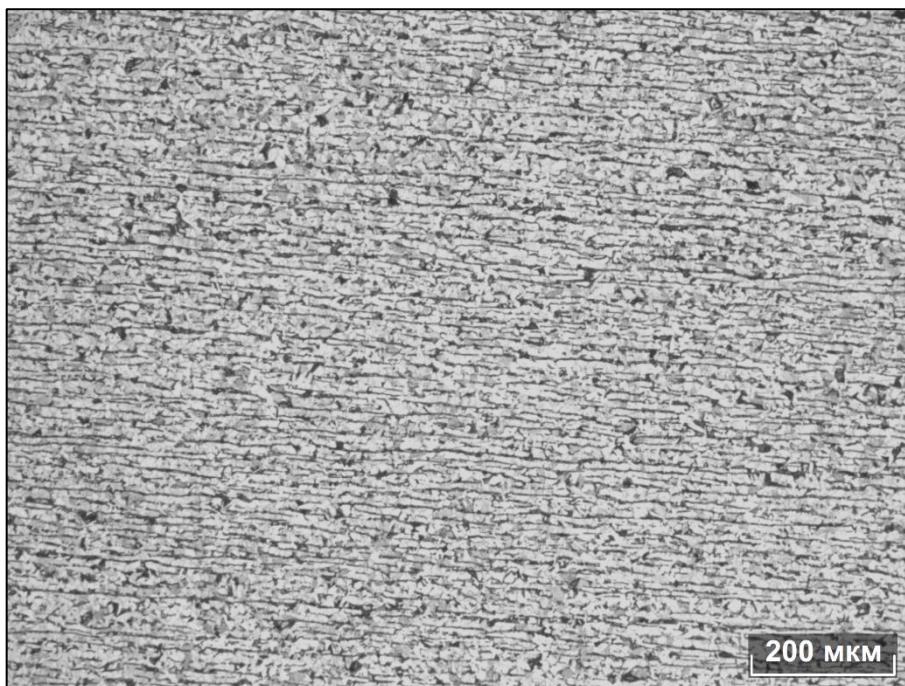


Рисунок 2.10 – Микроструктура в глубине от поверхности. Верхняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, x50

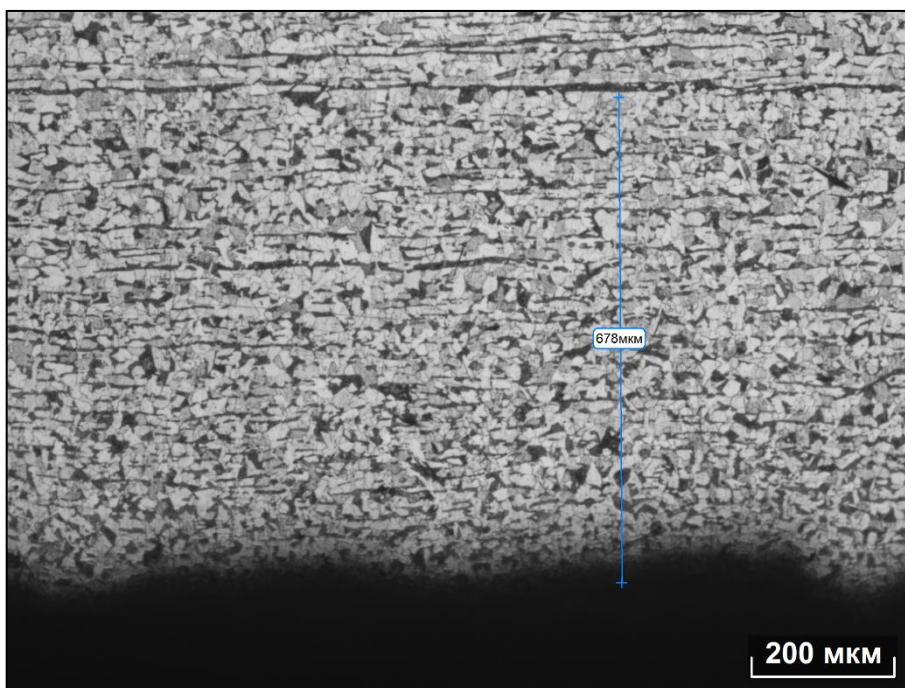


Рисунок 2.11 – Микроструктура с краю от поверхности. Нижняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, x100

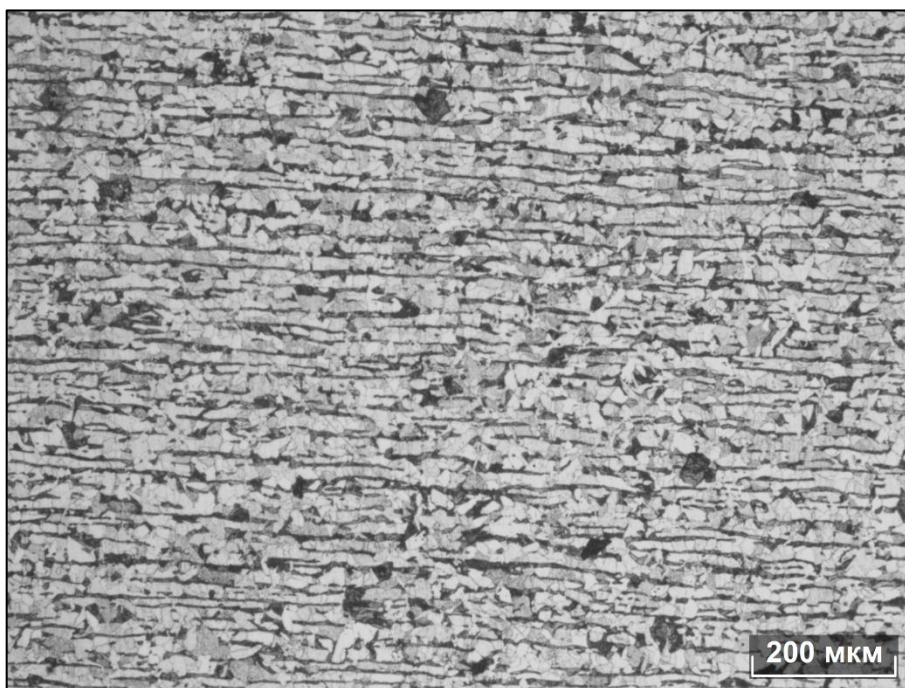


Рисунок 2.12 – Микроструктура в глубине от поверхности. Нижняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, x100

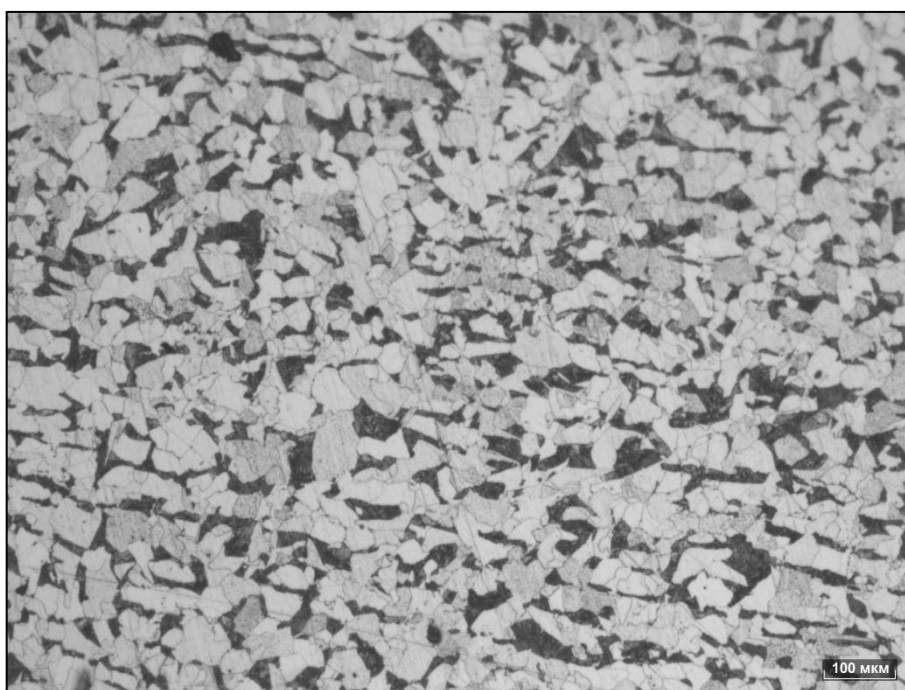


Рисунок 2.13 – Микроструктура с краю от поверхности. Верхняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, x200



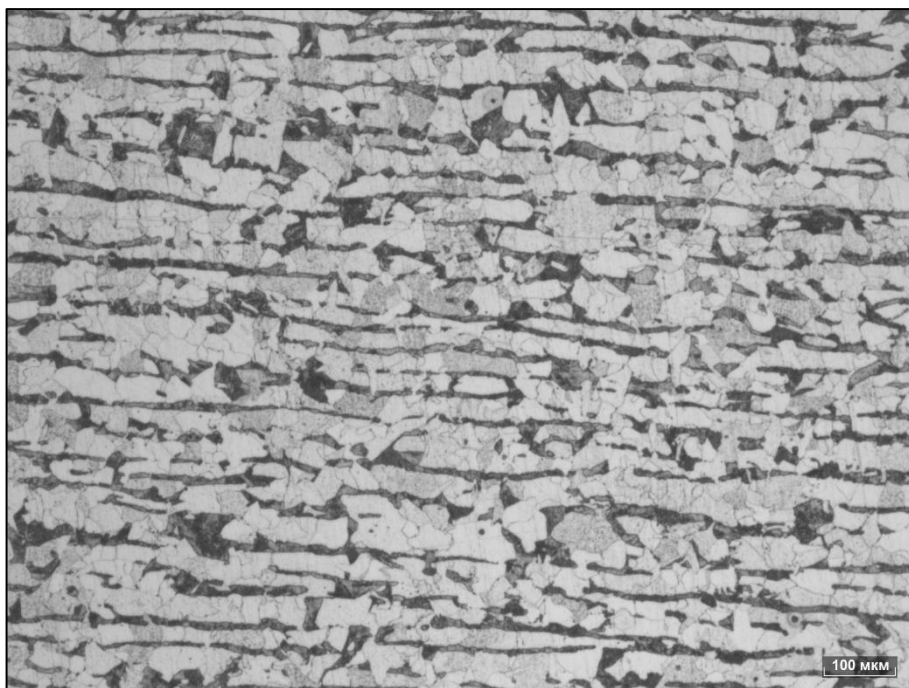


Рисунок 2.14 – Микроструктура в глубине от поверхности. Верхняя сторона опорной полки. Поперечное сечение, x200

На полученных фотографиях видим, что микроструктура стали 12Г2ФД представляет собой феррито-перлитную структуру. На расстоянии 300 мкм от поверхности со стороны верхней опорной полки наблюдается полосчатость перлитных зерен (см. рисунки 2.10, 2.12 и 2.14), а около поверхности полосчатость пропадает (см. рисунок 2.13), что говорит о том, что вблизи поверхности произошла рекристаллизация. Похожая особенность наблюдается со стороны нижней опорной полки – на расстоянии 676 мкм перлит приобретает вытянутую форму (см. рисунки 2.11 и 2.12).

На рисунках 2.15 и 2.16 представлены фото микроструктуры, на которых с помощью программного пакета «Thixomet PRO» была оценена доля перлита (перлит выделен синим цветом). Автор благодарит Кареву Н.Т. в оказании помощи по работе в данном программном пакете. Анализ показал, что доля перлита с краю от поверхности составляет 28,5%, в глубине – 31,3%.

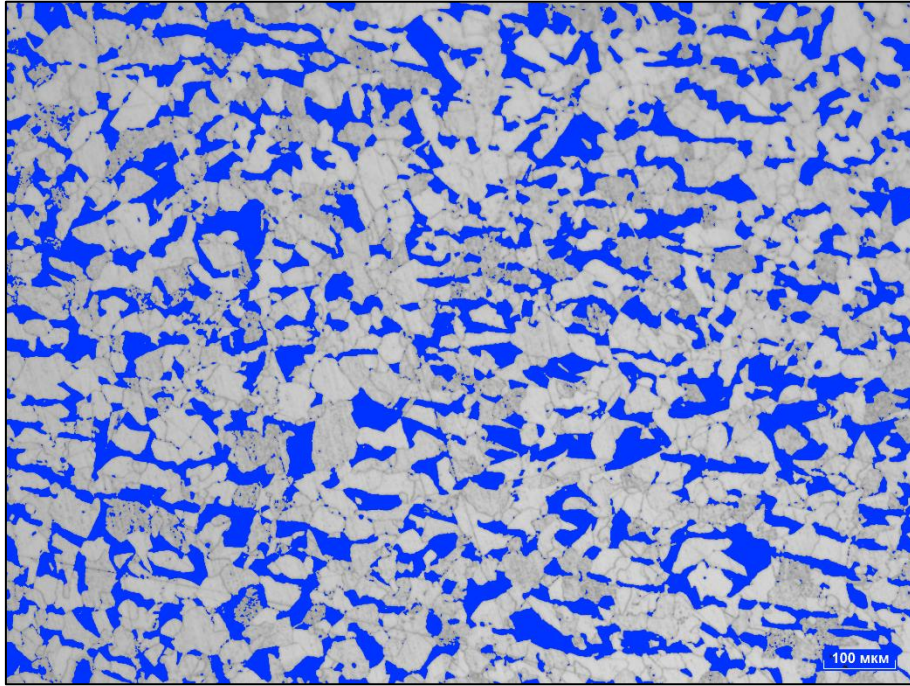


Рисунок 2.15 – Оценка доли перлита. Край от поверхности со стороны верхней опорной полки. Перлит выделен синий цветом. Поперечное сечение, x200

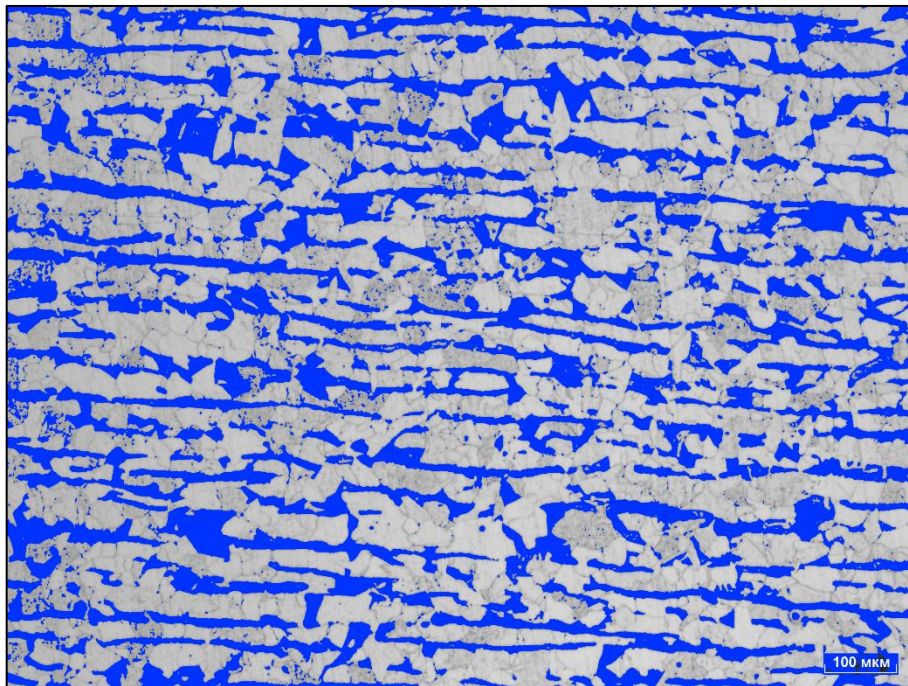


Рисунок 2.16 – Оценка доли перлита на глубине от поверхности со стороны верхней опорной полки. Перлит выделен синий цветом. Поперечное сечение, x200



При исследовании образца также был оценен размер ферритных зерен (рисунки 2.17 и 2.18). Оценка показала, что размер зерен феррита составляет от 55,2 мкм до 284 мкм. В среднем размер ферритных зерен составляет 119,7 мкм.

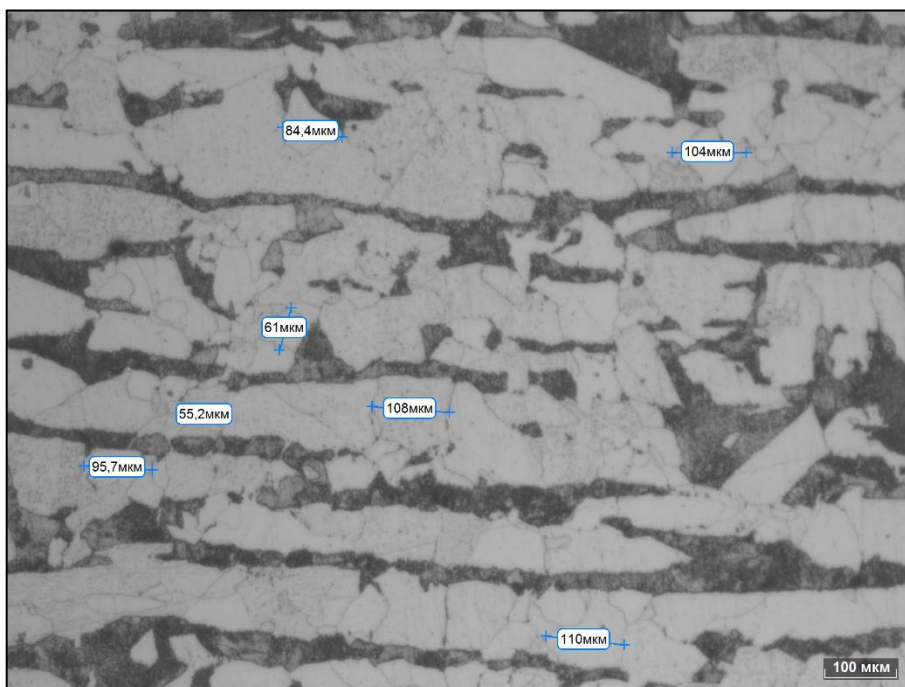


Рисунок 2.17 – Измерение зерен феррита. Поперечное сечение, x500

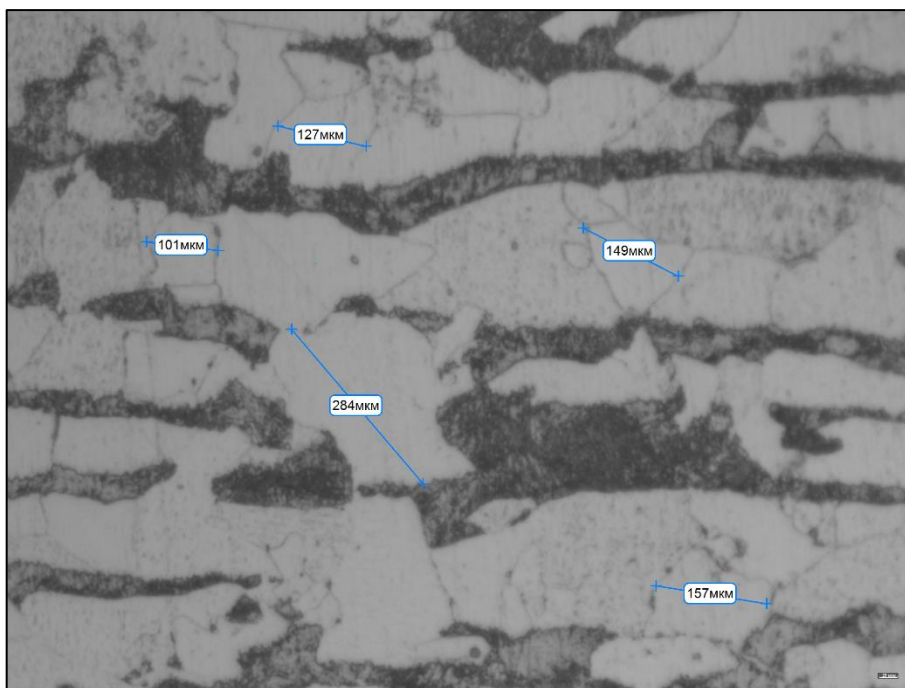


Рисунок 2.18 – Измерение зерен феррита. Поперечное сечение, x1000

С помощью программного пакета «Thixomet PRO» был проведен анализ фотографий микроструктуры для расчета площади и анизотропии перлитных зерен. На рисунке 2.19 представлено обработанное фото микроструктуры, сделанное в зоне около края от поверхности, на котором зерна перлита раскрашены разными цветами. Каждый цвет перлита относится к соответствующему размеру площади перлитных зерен, указанных на гистограмме (рисунок 2.20). На гистограмме по оси ординат отложено количество перлитных зерен (объем) в процентах, по оси абсцисс – площадь в  $\text{мкм}^2$ .

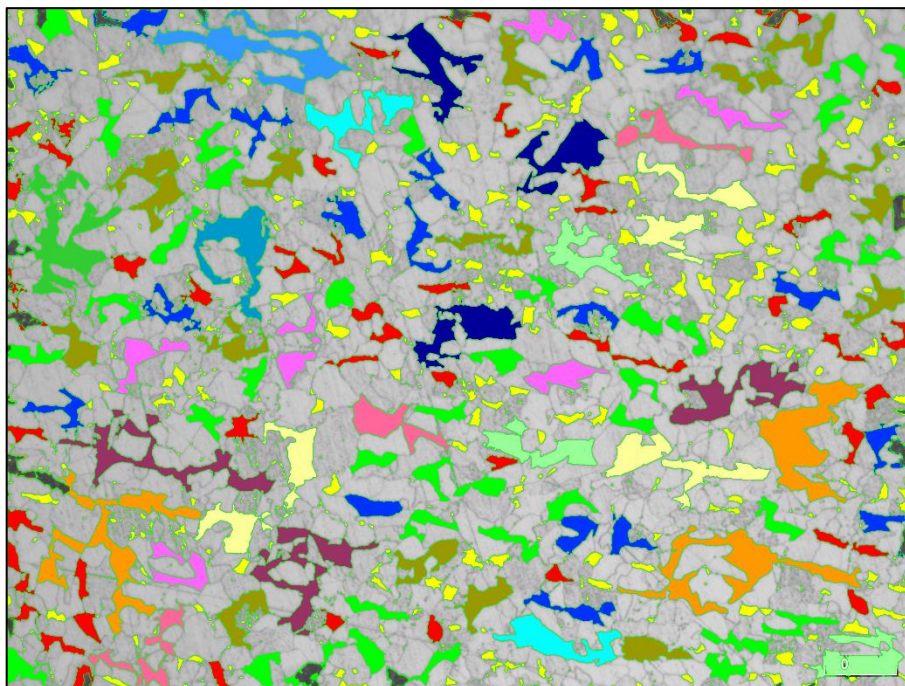


Рисунок 2.19 – Площадь перлитных зерен. Зона около края от поверхности. Поперечное сечение,  $\times 200$

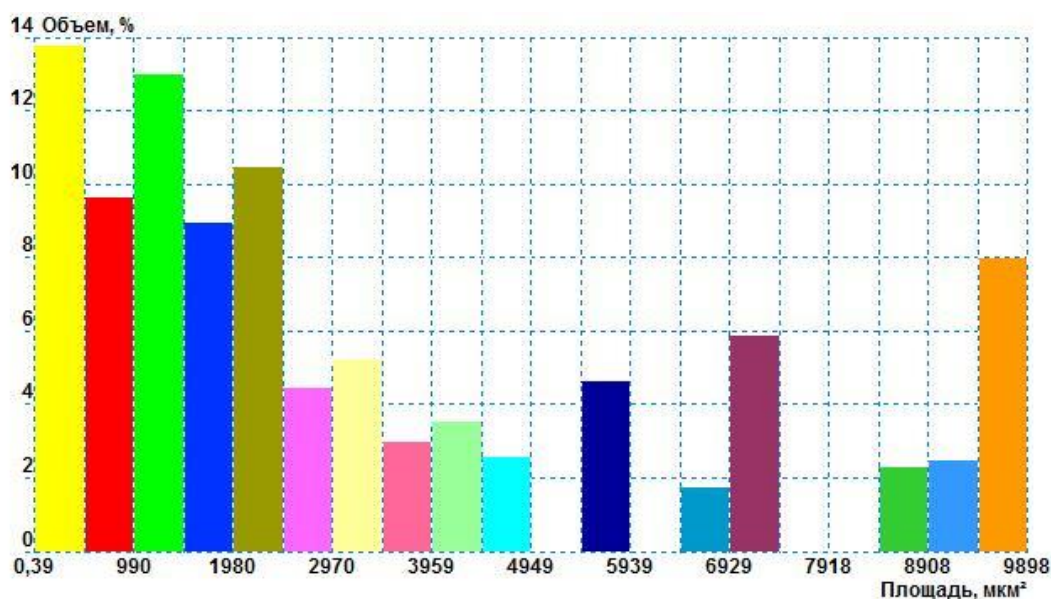


Рисунок 2.20 – Гистограмма распределения площадей перлитных зерен (к рисунку 2.19)

Точные данные расчета площадей перлитных зерен и их объемы приведены в таблице 2.10. Видно, что в основном зерна перлита имеют площадь от 0,39 до 1980 мкм<sup>2</sup>. Наибольший объем (13,8%) имеют зерна с площадью от 0,39 до 495 мкм<sup>2</sup> (желтый цвет на гистограмме (см. рисунок 2.20)). Наибольшую площадь от 9403 до 9898 мкм<sup>2</sup> имеют зерна, которые занимают 8,1% объема от всей рассматриваемой площади. Средний размер составляет 3335 мкм<sup>2</sup>.

Таблица 2.10 – Точные данные по анализу площадей перлитных зерен

| №  | Площадь, мкм <sup>2</sup> |      | Объем, % | Цвет на гистограмме |
|----|---------------------------|------|----------|---------------------|
|    | от                        | до   |          |                     |
| 1  | 0,39                      | 495  | 13,8     | желтый              |
| 2  | 495                       | 990  | 9,65     | красный             |
| 3  | 990                       | 1485 | 13       | зеленый             |
| 4  | 1485                      | 1980 | 8,99     | синий               |
| 5  | 1980                      | 2475 | 10,5     | коричневый          |
| 6  | 2475                      | 2970 | 4,49     | розовый             |
| 7  | 2970                      | 3464 | 5,27     | светложелтый        |
| 8  | 3464                      | 3959 | 2,99     | розовый             |
| 9  | 3959                      | 4454 | 3,56     | светлозеленый       |
| 10 | 4454                      | 4949 | 2,57     | голубой             |
| 11 | 4949                      | 5444 | 0        | нет                 |
| 12 | 5444                      | 5939 | 4,65     | темносиний          |
| 13 | 5939                      | 6434 | 0        | нет                 |
| 14 | 6434                      | 6929 | 1,79     | синий               |
| 15 | 6929                      | 7423 | 5,9      | фиолетовый          |
| 16 | 7423                      | 7918 | 0        | нет                 |
| 17 | 7918                      | 8413 | 0        | нет                 |
| 18 | 8413                      | 8908 | 2,32     | зеленый             |
| 19 | 8908                      | 9403 | 2,52     | синий               |
| 20 | 9403                      | 9898 | 8,01     | оранжевый           |

На рисунке 2.21 представлено фото микроструктуры, сделанное в зоне на глубине от поверхности, на котором также произвели анализ размера площадей перлитных зерен. На рисунке 2.22 указана гистограмма с соответствующими цветами площадей перлитных зерен.



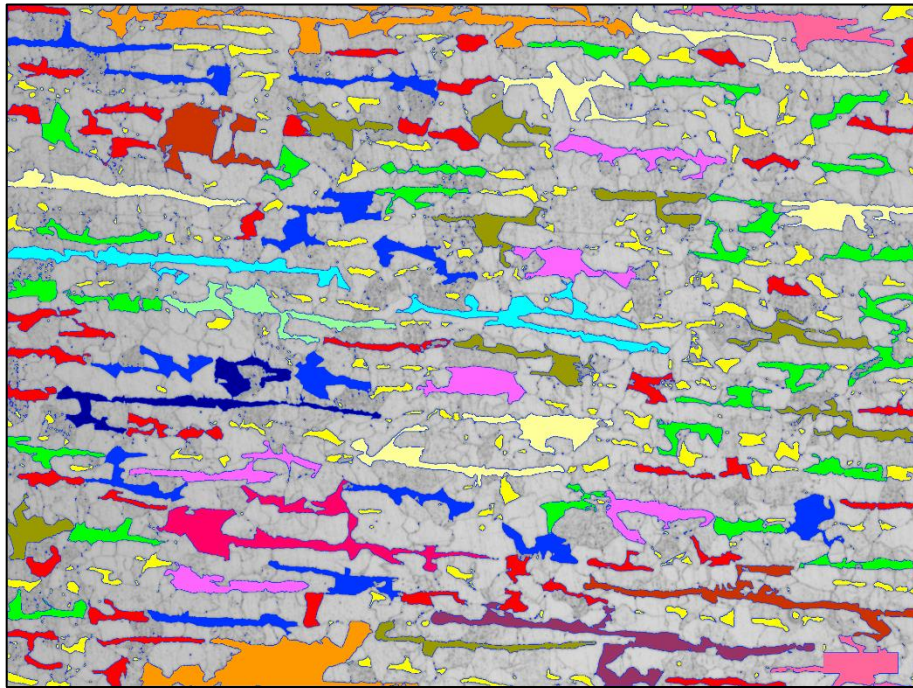


Рисунок 2.21 – Площадь перлитных зерен. Зона на глубине от поверхности. Поперечное сечение, x200

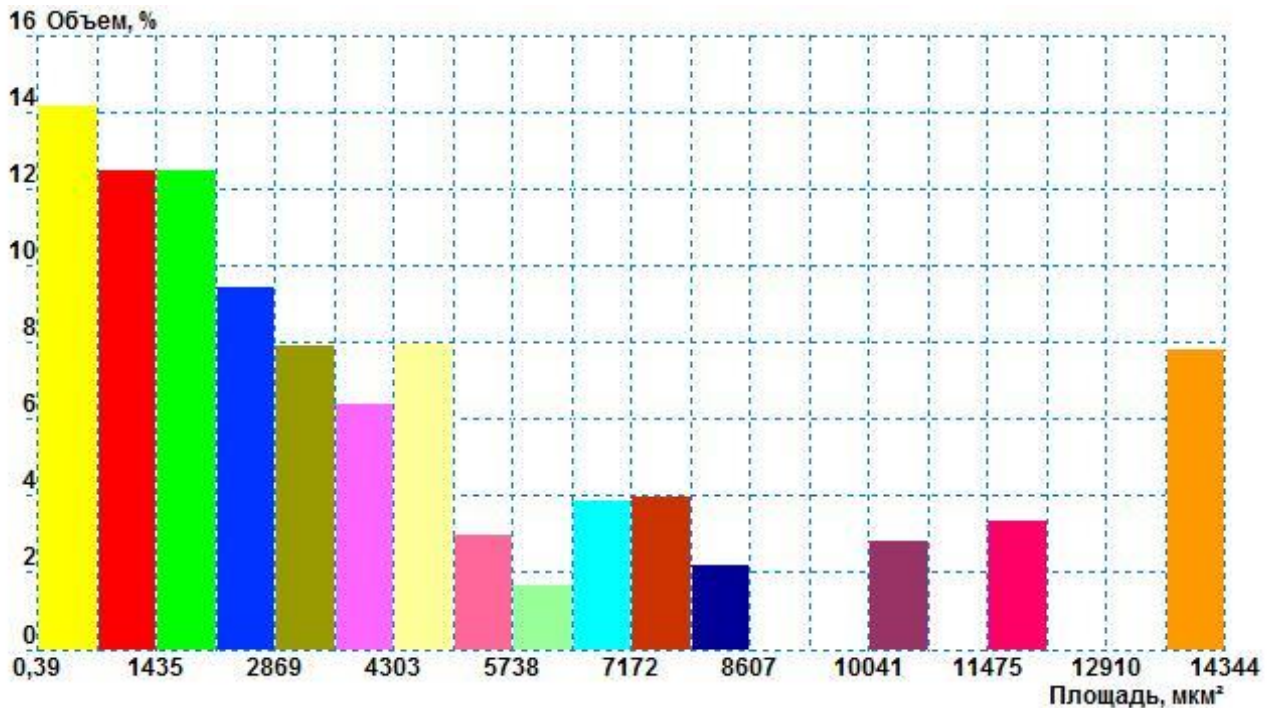


Рисунок 2.22 – Гистограмма распределения площадей перлитных зерен (к рисунку 2.21)

Точный расчёт площадей перлитных зерен и их занимаемый объем приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Точные данные по анализу площадей перлитных зерен

| №  | Площадь, мкм <sup>2</sup> |       | Объем, % | Цвет на гистограмме |
|----|---------------------------|-------|----------|---------------------|
|    | от                        | до    |          |                     |
| 1  | 0,39                      | 718   | 14,2     |                     |
| 2  | 718                       | 1435  | 12,5     |                     |
| 3  | 1435                      | 2152  | 12,5     |                     |
| 4  | 2152                      | 2869  | 9,47     |                     |
| 5  | 2869                      | 3586  | 7,94     |                     |
| 6  | 3586                      | 4303  | 6,42     |                     |
| 7  | 4303                      | 5021  | 7,99     |                     |
| 8  | 5021                      | 5738  | 3        |                     |
| 9  | 5738                      | 6455  | 1,71     |                     |
| 10 | 6455                      | 7172  | 3,93     |                     |
| 11 | 7172                      | 7889  | 4,03     |                     |
| 12 | 7889                      | 8607  | 2,25     |                     |
| 13 | 8607                      | 9324  | 0        | нет                 |
| 14 | 9324                      | 10041 | 0        | нет                 |
| 15 | 10041                     | 10758 | 2,84     |                     |
| 16 | 10758                     | 11475 | 0        | нет                 |
| 17 | 11475                     | 12192 | 3,36     |                     |
| 18 | 12192                     | 12910 | 0        | нет                 |
| 19 | 12910                     | 13627 | 0        | нет                 |
| 20 | 13627                     | 14344 | 7,84     |                     |

В данной зоне видно, что зерна перлита имеют наибольший объем 14,2% с площадью от 0,39 до 718 мкм<sup>2</sup>. Зерна в объеме 7,84 % имеют размер площади от 13627 до 14344 мкм<sup>2</sup>. В небольших объёмах до 4% присутствуют зерна с площадью от 5021 до 12192 мкм<sup>2</sup>. Средний размер зерен составляет 4328 мкм<sup>2</sup>.

Анизотропия формы перлита в зоне с краю от поверхности представлена на рисунке 2.23. Гистограмма зависимости анизотропности от объема представлена на рисунке 2.24.

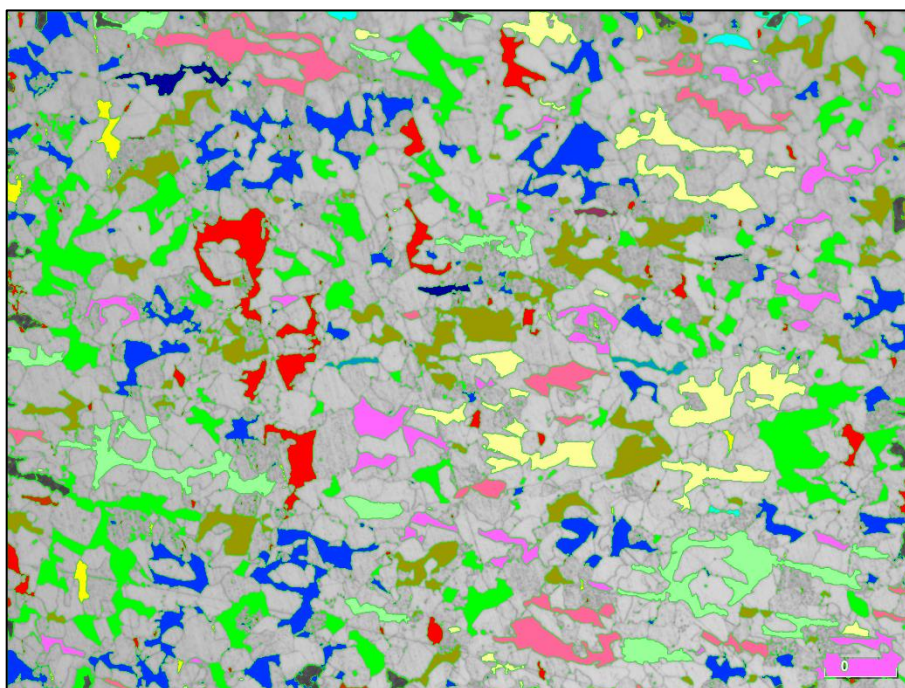


Рисунок 2.23 – Анизотропия перлитных зерен. Зона с краю от поверхности. Поперечное сечение, x200

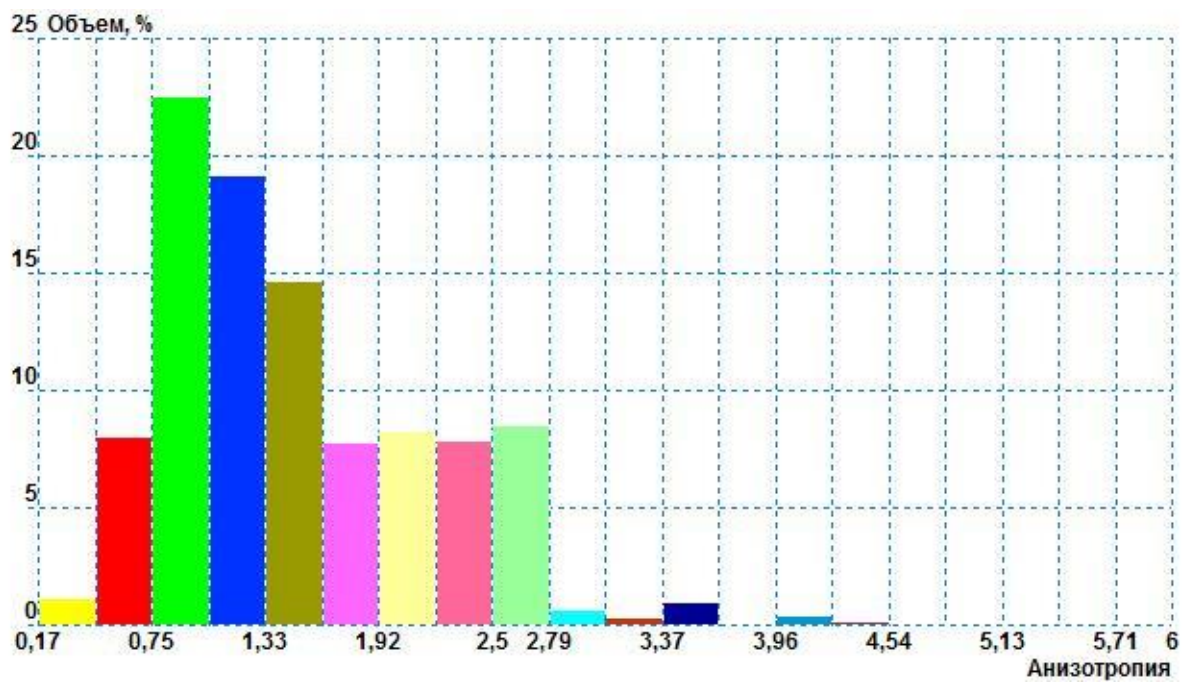


Рисунок 2.24 – Гистограмма распределения анизотропии перлитных зерен (к рисунку 2.23)



В таблице 2.12 приведены точные данные анизотропии перлитных зерен в зоне с краю от поверхности.

Таблица 2.12 – Точные данные по анализу анизотропии перлитных зерен

| №  | Площадь, мкм <sup>2</sup> |      | Объем, % | Цвет на гистограмме |
|----|---------------------------|------|----------|---------------------|
|    | от                        | до   |          |                     |
| 1  | 0,17                      | 0,46 | 1,14     |                     |
| 2  | 0,46                      | 0,75 | 7,95     |                     |
| 3  | 0,75                      | 1,04 | 22,5     |                     |
| 4  | 1,04                      | 1,33 | 19,1     |                     |
| 5  | 1,33                      | 1,62 | 14,6     |                     |
| 6  | 1,62                      | 1,92 | 7,74     |                     |
| 7  | 1,92                      | 2,21 | 8,21     |                     |
| 8  | 2,21                      | 2,5  | 7,84     |                     |
| 9  | 2,5                       | 2,79 | 8,47     |                     |
| 10 | 2,79                      | 3,08 | 0,63     |                     |
| 11 | 3,08                      | 3,37 | 0,25     |                     |
| 12 | 3,37                      | 3,67 | 0,91     |                     |
| 13 | 3,67                      | 3,96 | 0,0078   |                     |
| 14 | 3,96                      | 4,25 | 0,38     |                     |
| 15 | 4,25                      | 4,54 | 0,16     |                     |
| 16 | 4,54                      | 4,83 | 0,037    |                     |
| 17 | 4,83                      | 5,13 | 0,007    |                     |
| 18 | 5,13                      | 5,42 | 0        | нет                 |
| 19 | 5,42                      | 5,71 | 0        | нет                 |
| 20 | 5,71                      | 6    | 0,0019   |                     |

По рисункам 2.25, 2.26 и таблице 2.12 видно, что 22,5% зерен перлита имеют значение анизотропии от 0,75 до 1,05. Также большая доля объема 19,1 % и 14,6 % приходится на зерна перлита с анизотропией от 1,04 до 1,62. Присутствует мизерная доля объема меньше 1% со значением анизотропии более 4. В среднем анизотропия равна 1,5.

Данный анализ показывает, что в зоне около поверхности профиля часть зерен перлита (22,5%) имеет равноосную, невытянутую вдоль прокатки, форму перлита, что свидетельствует о прохождении рекристаллизации (ранее упоминалось). Однако, остальная часть объема зерен незначительно вытянулось вдоль прокатки. Мизерный процент доли перлита имеет большое вытягивание зерен вдоль прокатки.

Далее на рисунке 2.32 приведена анизотропность перлита в зоне на глубине от поверхности. Соответствующая гистограмма зависимости анизотропности от объема представлена на рисунке 2.33.

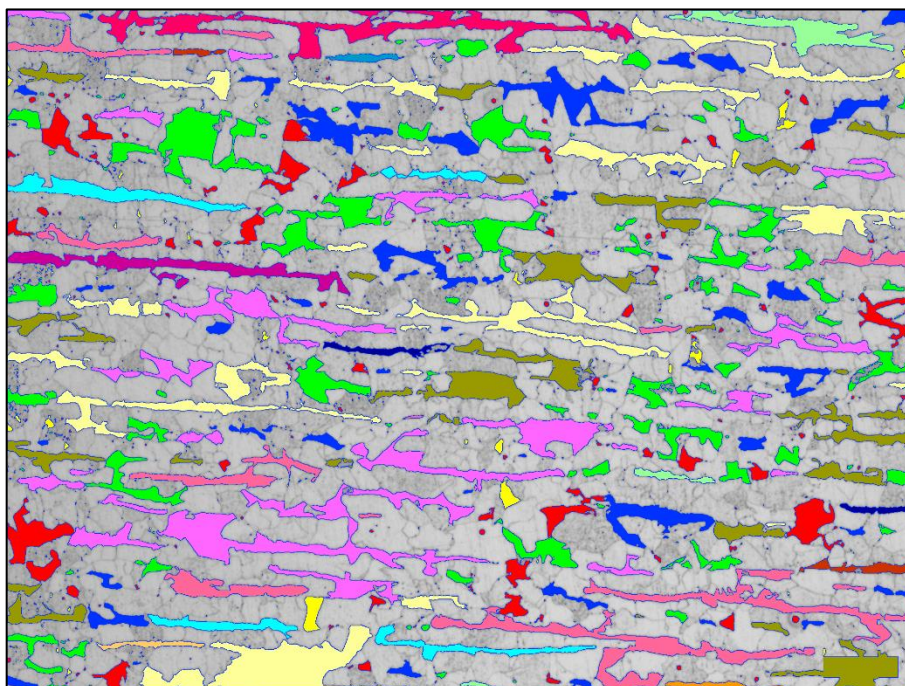


Рисунок 2.25 – Анизотропия перлитных зерен. Зона на глубине от поверхности. Поперечное сечение, x200

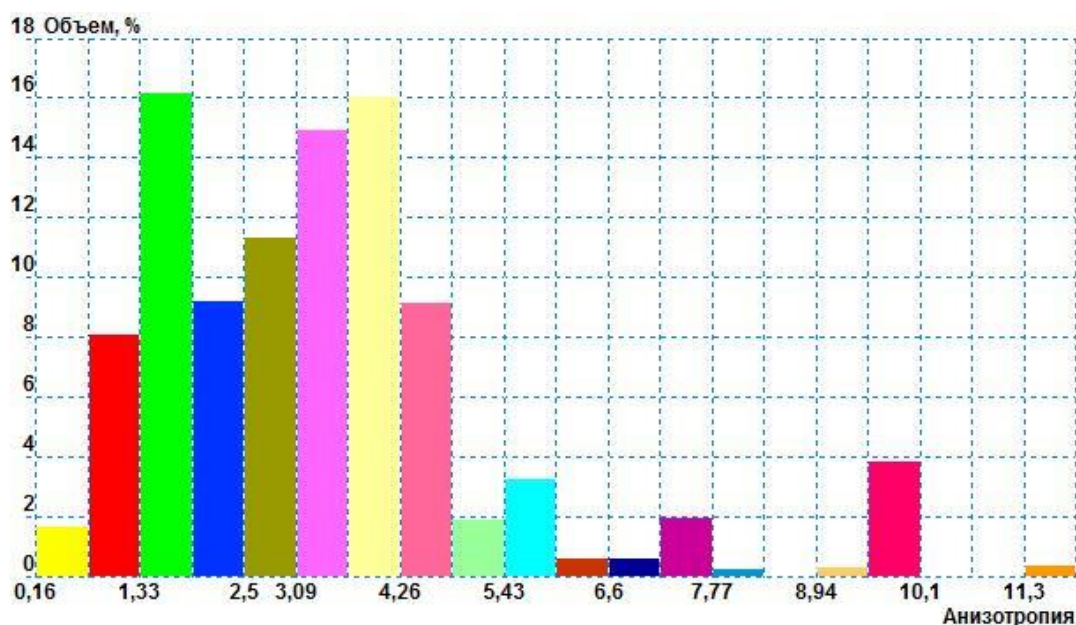


Рисунок 2.26 – Гистограмма распределения анизотропии перлитных зерен (к рисунку 2.25)

Точные данные анизотропии перлитных зерен в данной зоне приведены в таблице 2.13.



Таблица 2.13 – Точные данные по анализу анизотропии перлитных зерен

| №  | Площадь, мкм <sup>2</sup> |      | Объем, % | Цвет на гистограмме |
|----|---------------------------|------|----------|---------------------|
|    | от                        | до   |          |                     |
| 1  | 0,16                      | 0,74 | 1,69     |                     |
| 2  | 0,74                      | 1,33 | 8,1      |                     |
| 3  | 1,33                      | 1,91 | 16,2     |                     |
| 4  | 1,91                      | 2,5  | 9,25     |                     |
| 5  | 2,5                       | 3,09 | 11,3     |                     |
| 6  | 3,09                      | 3,67 | 15       |                     |
| 7  | 3,67                      | 4,26 | 16,1     |                     |
| 8  | 4,26                      | 4,84 | 9,18     |                     |
| 9  | 4,84                      | 5,43 | 1,94     |                     |
| 10 | 5,43                      | 6,01 | 3,28     |                     |
| 11 | 6,01                      | 6,6  | 0,6      |                     |
| 12 | 6,6                       | 7,18 | 0,63     |                     |
| 13 | 7,18                      | 7,77 | 1,97     |                     |
| 14 | 7,77                      | 8,36 | 0,25     |                     |
| 15 | 8,36                      | 8,94 | 0        | нет                 |
| 16 | 8,94                      | 9,53 | 0,3      |                     |
| 17 | 9,53                      | 10,1 | 3,85     |                     |
| 18 | 10,1                      | 10,7 | 0        | нет                 |
| 19 | 10,7                      | 11,3 | 0        | нет                 |
| 20 | 11,3                      | 11,9 | 0,38     |                     |

Видно, что примерно одинаковую долю объема имеют зерна перлита с анизотропностью от 1,33 до 1,91 и от 3,67 и 4,26 (16,2% и 16,1%, соответственно). Относительно такую же долю объема имеют зерна со значением анизотропии от 2,5 до 4,26 (см. таблицу 2.13). Со значением анизотропии до 10,1 присутствуют зерна с долей объема 3,85%. Около 8% объема имеются зерна с анизотропией от 0,74 до 1,33. Среднее значение анизотропии составляет 3,43.

Из данного анализа можно сделать вывод, что в основном зерна перлита в зоне на глубине от поверхности имеют вытянутую форму, причем попадаются зерна (с анизотропией до 12) сильно вытянутые в длину вдоль прокатки. Приведенное среднее значение анизотропии, показывает, что в среднем длина зерна перлита вдоль прокатки почти в 3,5 раза выше, чем длина зерна, перпендикулярное прокатке. Данные факты хорошо иллюстрируют явление полосчатости перлитных зерен в глубине от поверхности.

## 2.2.4 Построение модели зависимости механических свойств от химического состава стали

С целью разработать методику расчётного прогнозирования и управления механическими свойствами Z-образного профиля было обработано большое количество данных ПАО «ЧМК» по нормируемым свойствам (предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное удлинение  $\delta$ ) совместно с данными о плавочном химическом составе.

Микроструктура стали во всех случаях была феррито-перлитной (см. раздел 2.2.3), размер ферритного зерна колебался в пределах 55,2 - 284 мкм, перлитных колоний — 46 - 198 мкм.

Таблица 2.14 – Химический состав плавков, учтенный в анализе

| Плавка | Марка стали | C       | Mn   | Si   | Al   | P     | S     | N     | Cu   | Cr   | V    | Ni   |
|--------|-------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|        |             | Масс, % |      |      |      |       |       |       |      |      |      |      |
| 1      | 12Г2ФД      | 0,13    | 1,42 | 0,35 | 0,04 | 0,017 | 0,007 | 0,005 | 0,21 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| 2      | 12Г2ФД      | 0,13    | 1,58 | 0,27 | 0,04 | 0,017 | 0,010 | 0,005 | 0,24 | 0,05 | 0,08 | 0,04 |
| 3      | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,55 | 0,25 | 0,03 | 0,015 | 0,007 | 0,006 | 0,23 | 0,06 | 0,07 | 0,05 |
| 4      | 12Г2ФД      | 0,13    | 1,45 | 0,27 | 0,04 | 0,011 | 0,007 | 0,008 | 0,20 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 5      | 12Г2ФД      | 0,13    | 1,50 | 0,29 | 0,03 | 0,019 | 0,004 | 0,007 | 0,22 | 0,05 | 0,06 | 0,03 |
| 6      | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,53 | 0,28 | 0,02 | 0,025 | 0,004 | 0,008 | 0,22 | 0,08 | 0,07 | 0,04 |
| 7      | 12Г2ФД      | 0,15    | 1,52 | 0,32 | 0,04 | 0,013 | 0,005 | 0,007 | 0,23 | 0,07 | 0,06 | 0,03 |
| 8      | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,52 | 0,31 | 0,04 | 0,016 | 0,005 | 0,005 | 0,21 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| 9      | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,52 | 0,29 | 0,03 | 0,017 | 0,005 | 0,005 | 0,23 | 0,09 | 0,06 | 0,07 |
| 10     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,47 | 0,29 | 0,04 | 0,016 | 0,006 | 0,007 | 0,20 | 0,09 | 0,06 | 0,04 |
| 11     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,45 | 0,26 | 0,04 | 0,019 | 0,008 | 0,007 | 0,20 | 0,11 | 0,06 | 0,04 |
| 12     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,50 | 0,29 | 0,04 | 0,021 | 0,006 | 0,007 | 0,21 | 0,10 | 0,06 | 0,04 |
| 13     | 12Г2ФД      | 0,15    | 1,50 | 0,27 | 0,04 | 0,016 | 0,009 | 0,007 | 0,22 | 0,11 | 0,06 | 0,04 |
| 14     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,50 | 0,26 | 0,03 | 0,017 | 0,008 | 0,007 | 0,21 | 0,10 | 0,06 | 0,05 |
| 15     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,54 | 0,31 | 0,03 | 0,018 | 0,007 | 0,008 | 0,23 | 0,06 | 0,08 | 0,03 |
| 16     | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,47 | 0,31 | 0,04 | 0,022 | 0,008 | 0,007 | 0,22 | 0,14 | 0,07 | 0,05 |

Таблица 2.15 – Механические свойства профиля Z310, учтенные в анализе

| Плавка                                         | Марка  | $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % |
|------------------------------------------------|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Требования ГОСТ 19281 для класса прочности 390 |        | 530                            | 390                            | 19           |
| Требования ГОСТ 19281 для класса прочности 440 |        | 590                            | 440                            | 19           |
| 1                                              | 12Г2ФД | 555                            | 415                            | 28           |
|                                                |        | 565                            | 420                            | 28           |
|                                                |        | 545                            | 405                            | 30           |
|                                                |        | 545                            | 410                            | 30           |
|                                                |        | 545                            | 405                            | 29           |
|                                                |        | 550                            | 410                            | 29           |
|                                                |        | 545                            | 410                            | 29           |
| 2                                              | 12Г2ФД | 570                            | 430                            | 28           |
|                                                |        | 570                            | 420                            | 26           |
| 3                                              | 12Г2ФД | 560                            | 420                            | 26           |
|                                                |        | 570                            | 415                            | 26           |
| 4                                              | 12Г2ФД | 560                            | 420                            | 27,5         |
|                                                |        | 570                            | 420                            | 27,5         |
| 5                                              | 12Г2ФД | 540                            | 405                            | 27           |
|                                                |        | 545                            | 405                            | 27           |
|                                                |        | 545                            | 405                            | 28           |
|                                                |        | 540                            | 405                            | 27,5         |
| 6                                              | 12Г2ФД | 545                            | 410                            | 28           |
|                                                |        | 550                            | 415                            | 27           |
| 7                                              | 12Г2ФД | 585                            | 445                            | 23           |
|                                                |        | 605                            | 465                            | 26           |
| 8                                              | 12Г2ФД | 570                            | 430                            | 26,5         |
|                                                |        | 570                            | 435                            | 26           |
| 9                                              | 12Г2ФД | 575                            | 440                            | 23           |
|                                                |        | 570                            | 430                            | 26,5         |
| 10                                             | 12Г2ФД | 570                            | 430                            | 26,5         |
|                                                |        | 560                            | 425                            | 26,5         |
| 11                                             | 12Г2ФД | 590                            | 450                            | 25,5         |
|                                                |        | 595                            | 455                            | 26           |
| 12                                             | 12Г2ФД | 580                            | 450                            | 26,5         |
|                                                |        | 580                            | 445                            | 27,5         |
| 13                                             | 12Г2ФД | 585                            | 445                            | 26           |
|                                                |        | 580                            | 440                            | 27           |
| 14                                             | 12Г2ФД | 590                            | 455                            | 26           |
|                                                |        | 595                            | 455                            | 27           |
| 15                                             | 12Г2ФД | 575                            | 435                            | 26           |
|                                                |        | 585                            | 450                            | 26           |
| 16                                             | 12Г2ФД | 600                            | 465                            | 26           |
|                                                |        | 630                            | 480                            | 25           |
| 17                                             | 12Г2ФД | 585                            | 440                            | 23,5         |
|                                                |        | 585                            | 445                            | 22           |

На основании отобранных наиболее надёжных данных была проведена процедура множественной линейной регрессии и выявлены следующие зависимости свойств от содержания основных элементов – таблица 2.16.

Таблица 2.16 — Коэффициенты регрессии зависимостей  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  и  $\delta$  от содержания основных элементов

| Элемент | $\sigma_B$ , МПа/мас. % | $\sigma_{0,2}$ , МПа/мас. % | $\delta$ , %/мас. % |
|---------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| —       | 307,1                   | —                           | 34,86               |
| C       | 1716                    | 2175                        | 80,07               |
| Si      | 105,5                   | —                           | -7,57               |
| Mn      | 115,1                   | 254,1                       | -10,49              |
| Al      | —                       | —                           | —                   |
| As      | —                       | —                           | —                   |
| Cr      | —                       | —                           | -41,90              |
| Cu      | -1290                   | -1468                       | —                   |
| N       | —                       | —                           | —                   |
| Ni      | —                       | —                           | 32,62               |
| P       | —                       | —                           | —                   |
| S       | —                       | —                           | —                   |
| V       | 1706                    | 1101                        | —                   |

При этом из рассмотрения исключались те элементы, для которых доверительные интервалы коэффициентов регрессии существенно (в несколько раз) превышали сами значения. Степень согласия расчётных и экспериментальных кривых иллюстрируют рисунки 2.27, 2.28 и 2.29.

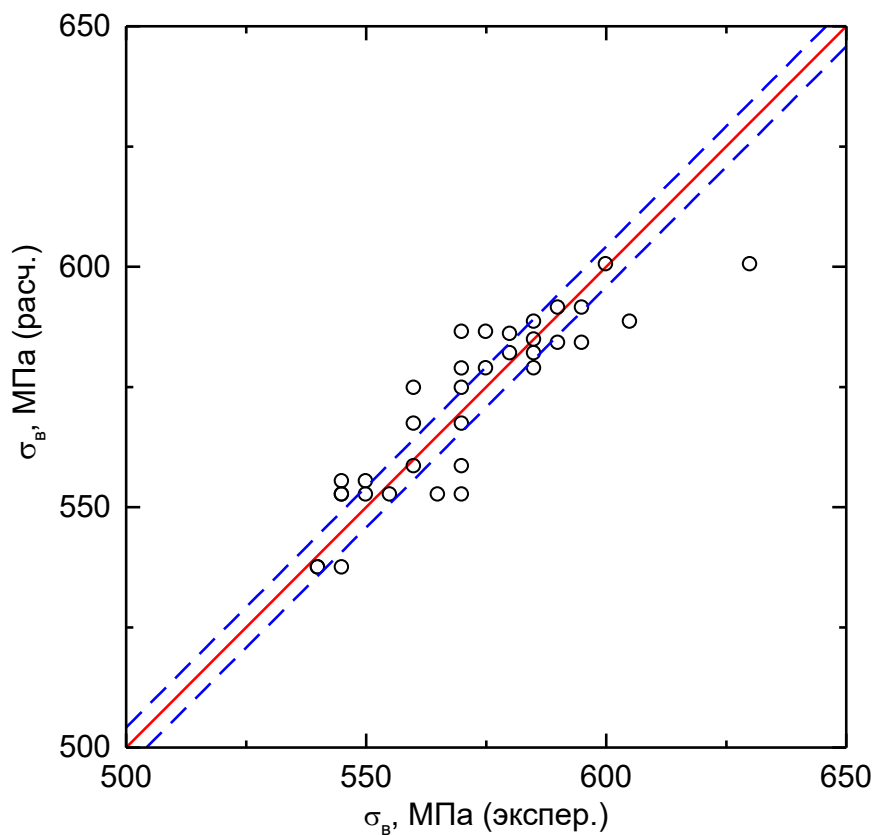


Рисунок 2.27 – Степень согласия расчётных и экспериментальных кривых для предела прочности  $\sigma_B$

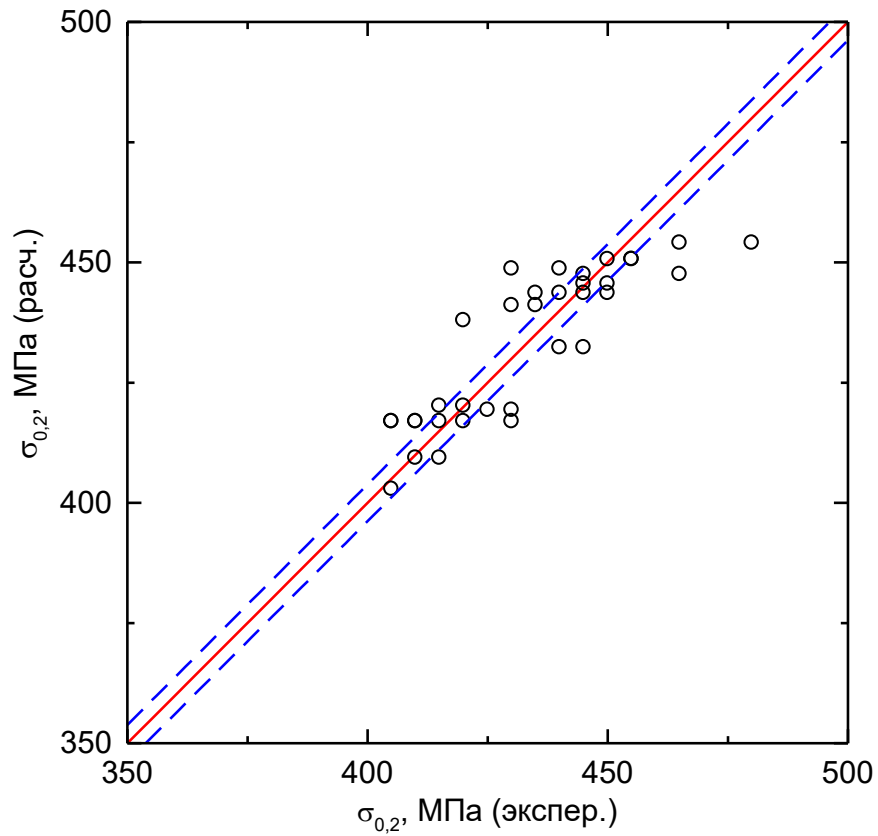


Рисунок 2.28 – Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых для предела текучести  $\sigma_{0,2}$

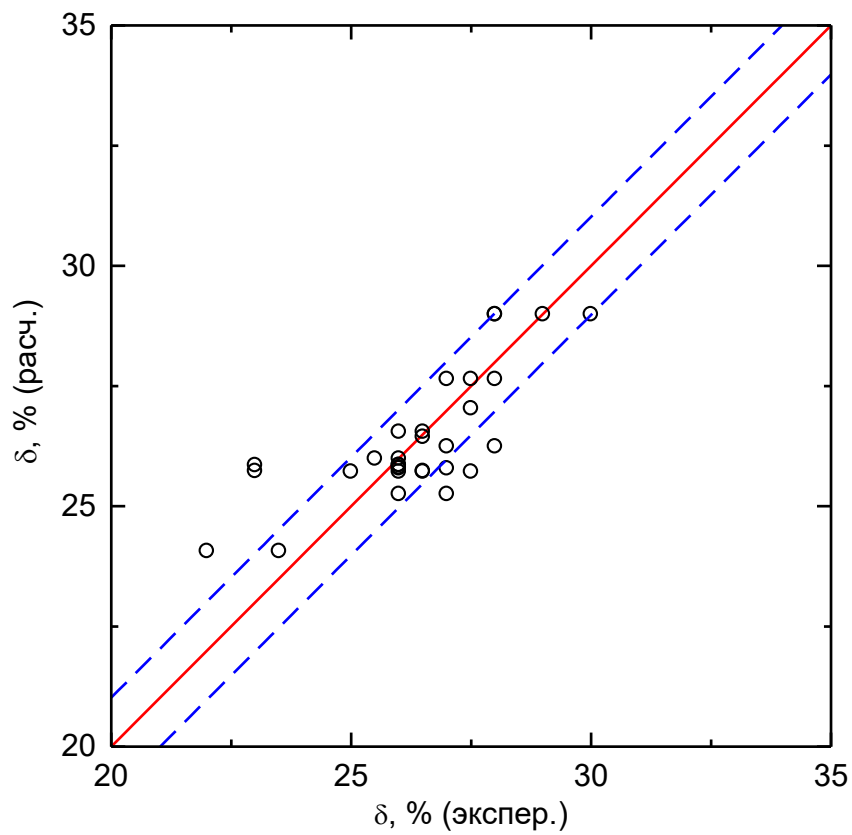


Рисунок 2.29 – Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых для относительного удлинения  $\delta$

Как видно из рисунков (см. рисунки 2.27, 2.28 и 2.29), расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными, поэтому полученную регрессионную модель зависимости механических свойств от химического состава стали можно считать адекватной.

Для проверки адекватности модели на ПАО «ЧМК» были прокатаны две опытные плавки профиля Z310 с химическим составом, рассчитанным по коэффициентам регрессии полученной модели для получения требуемых свойств. Химический состав опытных плавок приведен в таблице 2.17. Расчетные и экспериментальные механические свойства приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.17 – Химический состав опытных плавок профиля Z310

| Плавка            | Марка стали | C       | Mn   | Si   | Al   | P     | S     | N     | Cu   | Cr   | V    | Ni   |
|-------------------|-------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|                   |             | Масс, % |      |      |      |       |       |       |      |      |      |      |
| Опытная плавка №1 | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,54 | 0,30 | 0,03 | 0,023 | 0,007 | 0,004 | 0,22 | 0,08 | 0,07 | 0,03 |
| Опытная плавка №2 | 12Г2ФД      | 0,14    | 1,55 | 0,29 | 0,03 | 0,021 | 0,009 | 0,008 | 0,21 | 0,07 | 0,08 | 0,03 |

Таблица 2.18 – Расчетные и экспериментальные механические свойства опытных плавок профиля Z310

| Плавка                                         | Марка  | $\sigma_B, \text{H/мм}^2$ |         | $\sigma_T, \text{H/мм}^2$ |         | $\delta, \%$ |        |
|------------------------------------------------|--------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|--------------|--------|
| Требования ГОСТ 19281 для класса прочности 440 |        | 590                       |         | 440                       |         | 19           |        |
|                                                |        | Эксп.                     | Расч.   | Эксп.                     | Расч.   | Эксп.        | Расч.  |
| Опытная плавка №1                              | 12Г2ФД | 600                       | 591,864 | 465                       | 449,924 | 25,5         | 25,271 |
|                                                |        | 600                       |         | 465                       |         | 26,5         |        |
|                                                |        | 605                       |         | 470                       |         | 25           |        |
|                                                |        | 595                       |         | 460                       |         | 26           |        |
| Опытная плавка №2                              | 12Г2ФД | 610                       | 621,92  | 475                       | 478,155 | 27           | 25,661 |
|                                                |        | 620                       |         | 470                       |         | 28           |        |
|                                                |        | 605                       |         | 465                       |         | 28           |        |
|                                                |        | 610                       |         | 470                       |         | 27,5         |        |

Для наглядной проверки адекватности модели, расчетные и экспериментальные данные от опытных плавок были включены в рисунки 2.27, 2.28 и 2.29. Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых со старыми и новыми данными (данные опытных плавок) представлены на рисунках 2.30, 2.31 и 2.32. Новые данные отображены точками сплошного черного цвета.

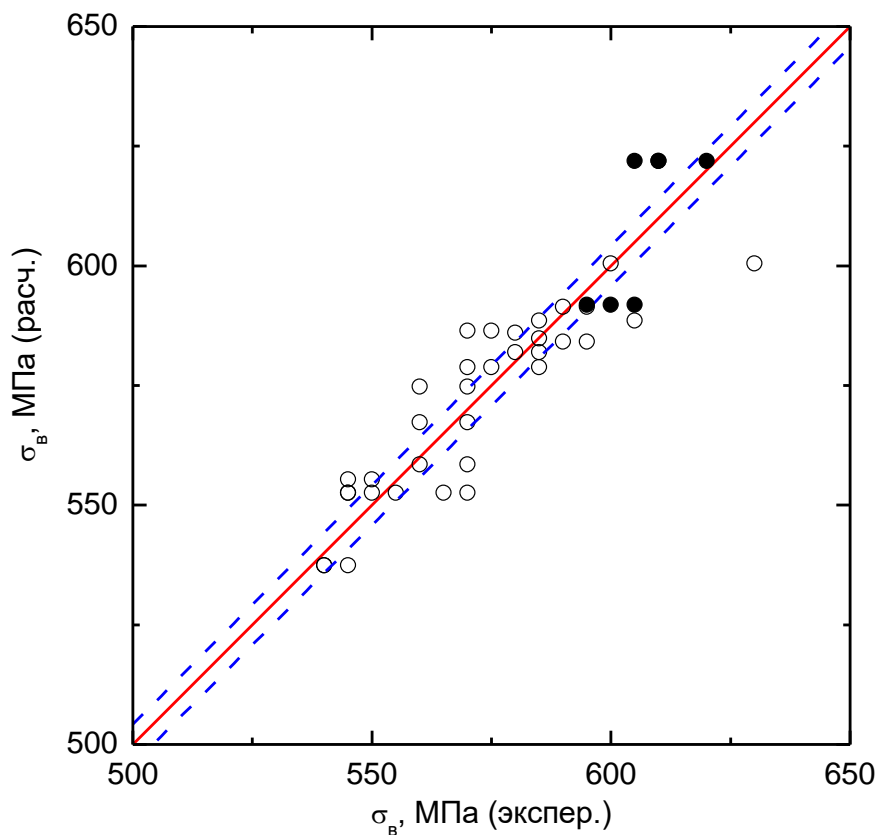


Рисунок 2.30 – Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых для предела прочности  $\sigma_B$  с добавленными точками опытных плавок (сплошные черные точки)

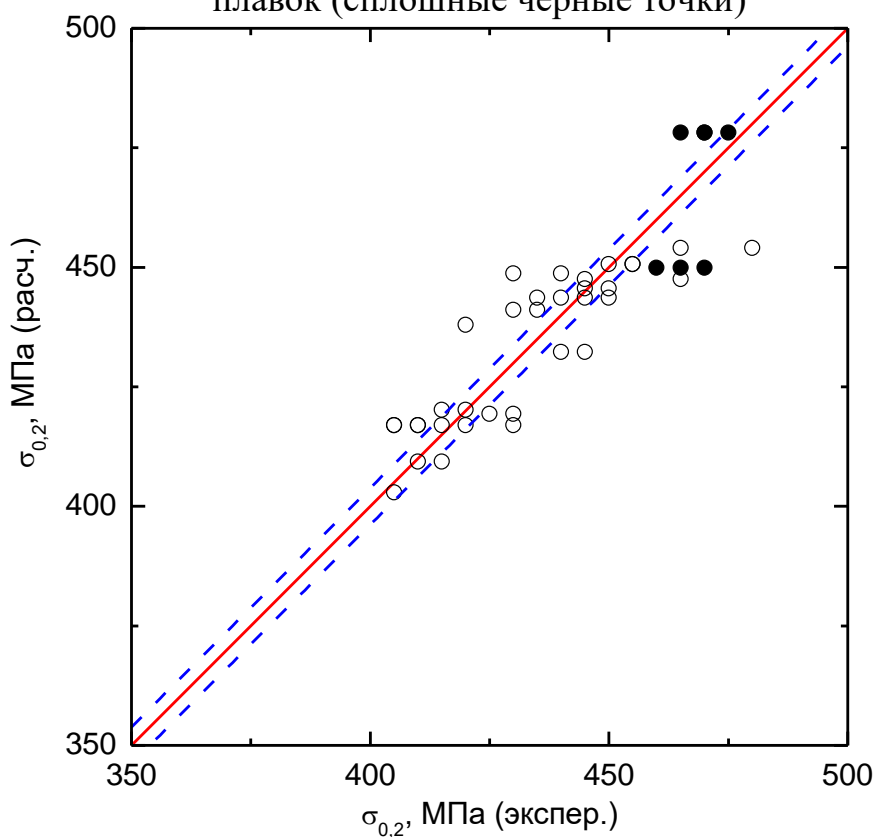


Рисунок 2.31 – Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых для предела текучести  $\sigma_{0,2}$  с добавленными точками опытных плавок (сплошные черные точки)

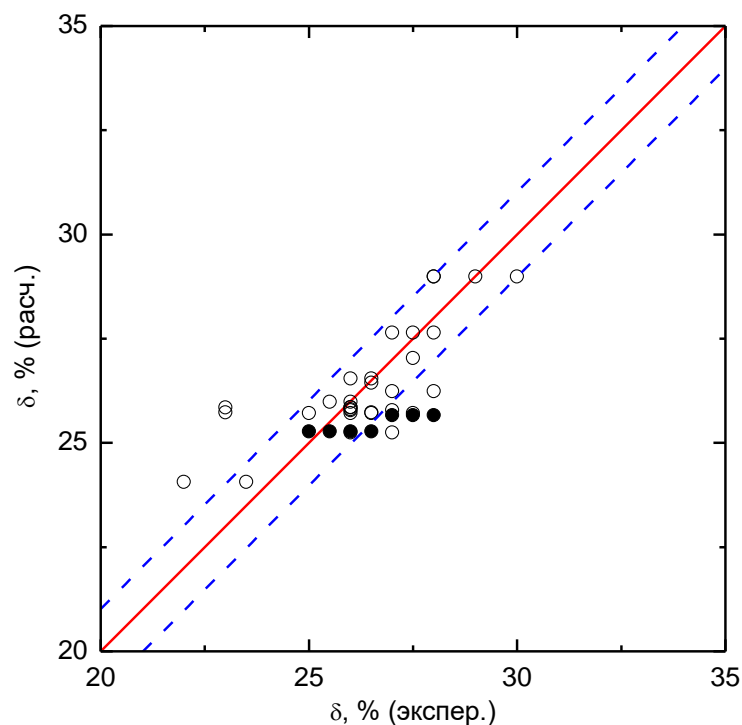


Рисунок 2.31 – Степень согласия расчетных и экспериментальных кривых для относительного удлинения  $\delta$  с добавленными точками опытных плавков (сплошные черные точки)

Видно, что в целом полученная модель регрессии механических свойств от химического состава выполняется. Данная модель позволяет прогнозировать требуемые свойства Z-образного профиля из марки стали 12Г2ФД от заданного химического состава.

#### *Выводы по разделу два*

На ПАО «ЧМК» зетовый профиль Z310 поставляют в горячекатаном состоянии из стали марок 09Г2С классом прочности 345 и 375 и 12Г2ФД классом прочности 375 и 390. В связи с тем, что данный профиль имеет большую толщину полок до 20,5 мм, в проведенной работе рассматривалась марка стали 12Г2ФД, так как при такой толщине профиля в горячекатаном состоянии сталь марки 09Г2С не гарантирует стабильное обеспечение класса прочности 390 и выше. Анализ диаграмм распада переохлажденного аустенита показал, что для сталей данного класса аустенитная структура обладает низкой устойчивостью и при охлаждении проката на воздухе формируется феррито-перлитная структура. Изучение микроструктуры подтвердило данный анализ. На основании большого количества данных ПАО «ЧМК» по нормируемым свойствам совместно с данными о плавочном химическом составе была построена регрессионная модель, которая позволила прогнозировать требуемые свойства Z-образного профиля из марки стали 12Г2ФД от заданного химического состава, что было подтверждено на опытных плавках.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривалась возможность обеспечения повышенного класса прочности 440 фасонного проката Z-образного профиля для вагоностроения.

До этого получаемые свойства профиля относились к классу прочности не выше 390, а заказчикам требовался профиль (Z310) с классом прочности 440 и выше.

После обработки большого числа данных, предоставленных ПАО «ЧМК», удалось построить регрессионную модель механических свойств от химического состава, которая позволяет прогнозировать требуемые свойства Z-образного профиля из марки стали 12Г2ФД от заданного химического состава. Адекватность модели была проверена путем выплавки опытных партий с химическим составом, рассчитанным по коэффициентам регрессии полученной модели. Расчетные и экспериментальные механические свойства после прокатки в профиль Z310 приемлемо согласовывались, а класс прочности соответствовал выше 440.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пастухов, И.Ф. Вагоны: Учебник для техникумов ж.-д. трансп./ И.Ф. Пастухов, В.В. Лукин, Н.И. Жуков / под ред. В.В. Лукина. – М.: Транспорт, 1988. – 280 с.
2. ГОСТ 5267.3-90. Межгосударственный стандарт. Профиль зетовый для хребтовой балки. Сортамент. Введен 01.07.1991. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 2 с.
3. ГОСТ 5267.0-90. Межгосударственный стандарт. Профили горячекатаные для вагоностроения. Общие технические условия. Введен 01.07.1991. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 6 с.
4. Беленький, Б.З. Стали с ванадием для фасонного и гнутого проката, используемого в вагоностроении // Проблемы производства и применение сталей с ванадием: мат-лы Международ. науч-техн. Семинара. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – ISBN 5 – 7691 – 1892 – С. 326 – 334.
5. ГОСТ 19281-2014. Межгосударственный стандарт. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. Введен 01.01.2015. – М.: Изд-во стандартов, 2016 – 46 с.
6. Гольдштейн, М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
7. Скороходов, В.Н. Строительная сталь / В.Н. Скороходов, П.Д. Одесский, А.В. Рудченко. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2002. - 624 с.
8. Пикеринг, Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Пикеринг Ф.Б.; пер. с англ. – М.: «Металлургия», 1982. – 184 с.
9. Дефекты стали. Справочное изд. / под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
10. Попов, А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана / А.А. Попов, Л.Е. Попова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1991. – 503 с.
11. ГОСТ 7564-97. Международный стандарт. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. Введен 01.01.1999. – М.: Изд-во стандартов, 2004 – 12 с.