

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Босов Егор Владимирович

Оценка возможности повышения эффективности ретроспективного анализа массивов  
данных производственного контроля процесса и продукта для задач управления качеством  
металлопродукции

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор

Кудря Александр Викторович

Москва – 2025

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Аналитический обзор литературы.....	8
1.1 Факторы качества стали .....	8
1.1.1 Пространство параметров качества .....	8
1.1.2 Неоднородность разномасштабных структур и её влияние на разброс качества .....	12
1.1.3. Роль «металлургического качества» .....	16
1.1.4 Технологическая наследственность при производстве материалов .....	18
1.2 Контроль качества процесса и продукта .....	20
1.3 Статистические методы для повышения качества металла.....	22
1.3.1 Статистические распределения и их основные характеристики.....	22
1.3.2 Практика использования статистических процедур в металлургии.....	25
1.3.3 Применение корреляционного и регрессионного анализа .....	27
1.3.4 Алгоритмы Big Data и машинного обучения.....	30
1.4 Возможности применения непараметрической статистики и когнитивной графики.....	36
1.5 Выводы по аналитическому обзору литературы .....	38
1.6 Постановка задач исследования .....	39
Глава 2. Объекты и методика исследования .....	40
2.1 Объекты исследования .....	40
2.2 Статистические методы.....	41
Глава 3. Результаты и их обсуждение.....	46
3.1 Предварительная обработка баз данных .....	46
3.2 Особенности оценки масштаба неоднородности качества металлопродукции .....	50
3.3 Влияние количества образцов на статистику распределения значений параметров качества металлопродукции .....	64
3.4 Оценка возможностей классической статистики для выявления факторов неоднородности качества (в пределах поля допуска технологического процесса) .....	83
3.5 Определение хладноломкости на основе анализа баз данных производственного контроля с использованием сложных эвристических приемов когнитивных графики .....	88
3.6 Развитие приемов когнитивной графики для выявления областей с доминирующим типом зависимостей .....	102
ВЫВОДЫ.....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	122

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

ЭШП – Электрошлаковый переплав

Мартен – Мартеновская выплавка

НВ – неметаллические включения

$\Delta$  – Размах — это разница между наибольшим и наименьшим результатами наблюдений

KCU – Ударная вязкость, Дж/см<sup>2</sup>

$\sigma_{0,2}$  – Предел текучести, МПа

$\sigma_B$  – Предел прочности, МПа

$\delta$  – Удлинение, %

$\psi$  – Относительное сужение, %

$\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  – Величина снижения ударной вязкости при понижении температуры испытания с плюс 20 °С (максимальное значение по двум образцам) до минус 50 °С (минимальное значение по двум образцам), характеризующая хладостойкость металла

## Введение

Процесс индустриализации мира диктует повышение спроса на металлургическую продукцию, что в свою очередь стимулирует рост цен на сырье и металлопродукцию. Это ведет к повышению запросов к требованиям и характеристикам стали у потребителей, требуя увеличение пороговых значений приемо-сдаточных свойств, что ведет за собой повышение неоднородности качества металла в рамках действующей технологии производства.

Для мониторинга качества металла каждый этап всей технологической цепочки оснащен средствами измерения и сбора информации. Это позволяет получить более полное представление о его реализации, а также предоставляет возможность для настройки технологии, в т.ч. в режиме реального времени. Все это осуществляется статистической обработкой больших массивов данных производственного процесса, которые накапливаются достаточно быстро и в большом количестве с учетом серийного (массового) характера.

Современное статистическое исследование состоит в поиске определенных закономерностей в событиях массового характера, каждое из которых по отдельности имеет достаточно случайное проявление (случайных характер). Для выявления закономерностей используются специальные статистические приемы, которые основаны на реализации так называемого выборочного изучения. Так как единой системы выявления закономерностей нет, происходит выбор из комплекса определённых статистических методов для поставленной цели.

Для статистического исследования нужно использовать многомерные нелинейные задачи, а не только с помощью классических статистических алгоритмов. Для этого нужно найти более эффективный комплекс алгоритмов анализа применимых в условиях металлургического производства. Но не стоит забывать и про явление технологической наследственности. Явление ведет в себе закономерное изменение структуры и дефектов в ходе технологического процесса, характеризует производство любых материалов, особенно сталей.

В этой связи разрабатывая алгоритмы Big Data должны основываться не только на статистических оценках, но и понимании механизмов структуры и дефектов в металле.

**Цель данной работы:** оценка эффективности применения методов статистического анализа баз данных производственного контроля технологии и продукта для выявления факторов неоднородности стали.

### **Научная новизна:**

1. Систематический анализ представительных массивов данных производственного контроля процессов получения широкого спектра металлопродукции (крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш, сорта из улучшаемой стали 40ХМФА, листовых сталей 13Г1С-У, 09Г2С, 15ХСНД), в рамках, действующих в различные периоды времени технологий, выявил отклонения в виде распределения значений приемо-сдаточных параметров от нормального вида распределения, диапазон изменений значений их коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ : от -0,81 до 2,12, и от -0,40 до 8,09 соответственно, что может повысить риски прогноза регрессионных моделей.

2. На основе анализа баз данных производственного контроля технологии получения листовой стали 13Г1С-У оценены степени риска, возникающие при ограничении количества образцов, используемых для оценки качества единицы металлопродукции с трех до двух и одного соответственно.

3. Подтверждена неэффективность регрессии и корреляционного анализа для прогноза качества металлопродукции (и факторов его определяющих) - высокий риск прогноза: от 0,44 (по модулю) и выше, что делает применение принципа управления качеством металла «по возмущению» не эффективным.

4. Показано, что разработанный с использованием приемов когнитивной графики двухпараметрический критерий хладостойкости крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш, основанный на использовании приемо-сдаточных параметров, входящих в базу штатных данных производственного контроля их качества ( $X_i^{max+20}$  и  $X_j^{min-50}$ ) по сравнению с обычными оценками снижения ударной вязкости  $\Delta_{ij} = X_i^{max+20} - X_j^{min-50}$ , позволяет разделить поковки на четыре группы по хладостойкости (по убыванию): от высокой до неудовлетворительной:  $\{\Delta_{ij1}\} < \langle \Delta_{ij} \rangle$  и  $\{\bar{X}_{ij1}\} > \langle \bar{X}_{ij} \rangle$ ;  $\{\Delta_{ij2}\} > \langle \Delta_{ij} \rangle$  и  $\{\bar{X}_{ij2}\} > \langle \bar{X}_{ij} \rangle$ ;  $\{\Delta_{ij3}\} < \langle \Delta_{ij} \rangle$  и  $\{\bar{X}_{ij3}\} > \langle \bar{X}_{ij} \rangle$ ;  $\{\Delta_{ij4}\} > \langle \Delta_{ij} \rangle$  и  $\{\bar{X}_{ij4}\} > \langle \bar{X}_{ij} \rangle$ .

### **Положения, выносимые на защиту:**

- оценки масштаба различий статистической природы объектов исследования - разнообразия видов распределения значений управляющих и приемо-сдаточных параметров, входящих в базы данных производственного контроля (в пределах поля допуска штатной, достаточно хорошо отлаженной технологии);

- возможность извлечения информации о взаимосвязи значений управляющих и приемо-сдаточных параметров с использованием регрессионного и корреляционного анализа;

- оценки рисков потери существенной информации, связанные с уменьшением количества образцов, используемых для определения качества единицы металлопродукции в рамках штатной аттестации её качества;

- приемы когнитивной графики, необходимые для выявления областей с доминирующим типом зависимости, в связи с поиском причин различий в хладостойкости крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш (на основе более детальной ранжировки хладостойкости по данным штатных испытаний).

**Практическая ценность** работы заключается в разработке алгоритмов и приемов статистических процедур, позволяющих выявлять на основе анализа баз данных производственного контроля критические параметры процесса, определяющие повышенный разброс качества металлопродукции. Предложенные алгоритмы и статистические процедуры были использованы на АО «ВМЗ» при решении прикладных исследовательских задач, направленных на повышение однородности качества металлопродукции (Акт о практическом применении).

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается при помощи обоснованных статистических процедур и программного обеспечения, представительным объемом анализируемых данных, учетом закономерностей протекания технологической наследственности в рамках исследуемых технологий, согласием полученных результатов с данными, имеющимися в научно-технической литературе.

**Личный вклад** соискателя состоит в: разработке плана исследования, методологии подбора статистических методов для проведения раскопок баз данных; количественной обработке баз данных и выявлении закономерностей в полученных результатах; разработке различных интерпретаций полученных результатов; обсуждении полученных результатов и формулировании выводов; написании статей и участии в конференциях.

#### **Вклад соавторов**

Научный руководитель Кудря А.В. – постановка цели и задач научной диссертации, участие в обсуждении результатов исследования и полученных выводов. Соколовская Э.А. – помощь в разработке методологических вопросов и алгоритмов обработки массивов данных, обсуждении результатов, в подготовке научных статей к публикации. Кодиров Д.Ф. – помощь в статистическом анализе полученных результатов. Тимошенко В. В. – помощь в построении графических зависимостей, Котишевский Г.В. – помощь в структурировании баз данных производственного контроля.

## **Публикации**

Основные результаты, полученные в ходе научной работы опубликованы в виде четырех статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и 5 тезисов в сборниках различных конференций.

### **Апробация работы:**

Результаты диссертации были представлены на 4 конференциях: X и XI Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», г. Москва, 2021 и 2023 гг, Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», г. Москва, 2022г. и XI Международная школа «Физическое материаловедение», 2023 г. г. Тольятти.

## **Глава 1. Аналитический обзор литературы**

### **1.1 Факторы качества стали**

#### **1.1.1 Пространство параметров качества**

С началом промышленной революции производители постоянно модернизируют и улучшают производственный процесс, а с приходом научно-информационной революции производственный процесс автоматизируется и проводятся исследования в области улучшения качества металлопродукции, для увеличения производимой линейки металлопродукции. Это связано с увеличением спроса металла в мире.

В книге [1] написано: «Качество стали – характеристика многомерная. Металл оказывается не годен ни на что, когда выполнена лишь одна из многих норм. А выполнимость почти каждой из них сегодня зависит не от одного агрегата или режима, а от всей технологической цепочки. Поэтому не только уровень, но и один лишь полный перечень обязательных норм для продукции – предмет обстоятельного анализа перед разработкой любых металлургических технологий», где указывается сложность технологического процесса и проведении оценки качества металла [1].

Качество продукции — это совокупность свойств, которые обеспечивают пригодность к эксплуатации и отвечает определенным потребностям в соответствии с её назначением [2].

Металлургические предприятия начали осознавать, что для повышения эффективности металлургического производства и увеличения реализации металла, стоит обратить внимание на качества металлопродукции. Качество продукции является важнейшим показателем высокотехнологического производственного процесса на предприятии. Для улучшения качества металлопродукции производители начали активно автоматизировать свои производственные процессы применяя информационные технологии, что уменьшило объём затрат на заработную плату в общей сумме расходов предприятия. Проведение автоматизации и оптимизации производственного процесса также помогло снизить влияние человеческого фактора на качество и уменьшило время на проведения оценки качества металлопродукции. Из-за чего производство металлопродукции усложнилось, введя дополнительные технологические цепочки: переплавку металла (в мартеновской печи, доменной печи, конвертерной, дуговая сталеплавильная печь и др.), термическую обработку, обработку металлов давлением (прокатку, прессование, ковку, штамповку), литьё и др. Каждый этап технологического процесса несет в себе различные траектории производства. Траектория может вносить изменения в структуру и неоднородность качества металлопродукцию [3].



Производство металлопродукции проходит через длинную технологическую последовательность, где каждый этап всей технологической цепочки оснащен средствами измерения и сбора информации [3]. Это позволяет получить более полное представление о его реализации, а также предоставляет возможность для настройки технологии, в том числе в режиме реального времени. Все это возможно осуществить с помощью статистической обработкой больших массивов данных производственного процесса, которые накапливаются достаточно быстро с учетом серийного (массового) характера.

Для оценки и управления качества металлопродукции на сегодняшний день применяют современные ИТ решения: нейросети, алгоритмы Big Data, машинное обучение и т. п., для обработки больших массивов данных производственного контроля процесса и продукта (Big Data) [4-6]. Контроль качества металлопродукции осуществляется информационными программами, которые работают на алгоритмах статистики. Это позволяет провести оценку качества металлопродукции и снизить затраты на непрерывном выпуске металлопродукции (массовое производство), за счет обработки больших массивов данных в режиме реального времени и проведении глубокого анализа факторов неоднородности качества металлопродукции.

Оценка качества металлопродукции в режиме реального времени проводится ретроспективным анализом. Суть данного анализа заключается в оценке и анализе готовой продукции. Где анализируются готовая продукция и её технологическая производственная траектория, которая меняется по ходу всей технологической цепочки производства металла. Так для проведения ретроспективного анализа (раскопок данных) нужно провести испытания по полученным образцам готовой продукции, по которым будет осуществляться контроль качества металлопродукции. В России контроль качества приходится на ГОСТ. Служба «входного» контроля в соответствии ГОСТ 24297–2013 регламентирует входной контроль, его задача заключается в контроле документации, показатели качества металла соответствующих нормам и условиям хранения. На «выходе» качество металлопродукции характеризуют:

- макроструктура и микроструктура металла
- вид излома;
- механические свойства
- размер и геометрия изделий;
- качество поверхности металла.

Для определение механических свойств металлопродукции проводят испытания, в результате которых получают данные о различных характеристиках механических свойств. Так в книге [7] описывается несколько основных групп для проведения испытаний:

- статические (плавное, относительно медленное изменение нагрузки образца и малая скорость деформации);
- динамические (резкое изменение величины нагрузки и большая скорость деформации);
- усталостные (многократное приложение к образцу изменяющихся нагрузок).

Основными характеристиками механических свойств, в данной работе являлись [7,8]:

- предел текучести  $\sigma_T$  – напряжение, соответствующее площадке текучести на диаграмме растяжения, или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (МПа) – напряжение, вызывающее пластическую деформацию, равную 0,2 %;
- предел прочности (или временное сопротивление)  $\sigma_B$  (МПа) – характеризует напряжения или деформации, соответствующие максимальным значениям нагрузки;
- ударная вязкость, КС (Дж/см<sup>2</sup>), работа удара отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора, регламентируется ГОСТ 9454–78;
- относительное удлинение  $\delta$  (%) – показывает, насколько увеличилась длина образца в процессе растяжения;
- относительное сужение  $\psi$  (%) – показывает степень утонения поперечного сечения образца после растяжения [1,8].

Стоит отметить, что пространство параметров качества должно отображать поведение материалов конструкции. В соответствии с этим все параметры должны выбираться под конкретные назначения так, чтобы максимально эффективно отобразить будущее поведение металлоконструкции, а именно: прочность, текучесть, вязкость и т.д. [9]. В статье [10] показано, как характеристики хладостойкости в аттестации массовой продукции оценивается косвенно, по уровню ударной вязкости, при некоторой отрицательной температуры испытаний (КСU<sup>-40</sup>, КСУ<sup>-60</sup>, КСУ<sup>-70</sup>), имея высокий разброс ударной вязкости (рисунок 1). В каком объеме эта информация есть в базе данных судить трудно, из-за большого протекания технологических траекторий.

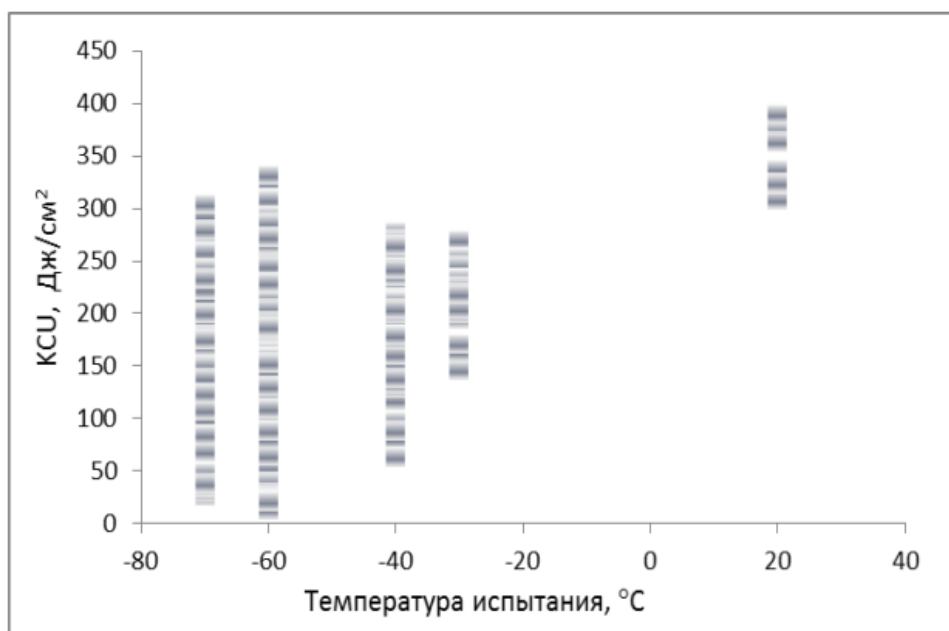


Рисунок 1 - Разброс ударной вязкости по различным температурам, листовой стали 09Г2С [10]

Исходя из того, что контролируется ударная вязкость при высокой температуре, не исключено, что из баз данных можно получить дополнительную информацию о параметрах качества металлопродукции. В ряде случаев нужно делать привязку к оценке микроструктуры для оценки хладостойкости. Расширение такого спектра испытаний позволит получить дополнительную информацию и дать расшифровку полученных ретроспективным анализом результатов по базам данных.

При выборе количества образцов для оценки пространства параметров качества с помощью проведение ретроспективного анализа баз данных сложно судить. Существующие на сегодня стандарты механических испытаний регламентируют форму, размеры и место вырезки образцов. Что касается выбора количества образцов, то в некоторых случаях указываются минимальные требования (ГОСТ 1497-84 пункт 1.7 - 2 образца), а в других (ГОСТ 9454-78) и вовсе отсутствует данная информация. Так или иначе, все сводится к требованиям заказчика (потребителя) и нормативно-технической документации на металлопродукцию. Отсюда можно предположить, что уменьшения количества образцов при проведении раскопок данных, ведет за собой риск уменьшения информативности результатов, для более адекватного понимания причин неоднородности качества металлопродукции, с учетом статистической природы значений технологического процесса.

## 1.1.2 Неоднородность разномасштабных структур и её влияние на разброс качества

Неоднородность разномасштабных структур влияет на разброс уровня прочности, пластичности и вязкости. Главнейшим фактором, воздействующим на разность величины зерна при кристаллизации, представляет перед собой степень переохлаждения [1]. Это когда образование малого количества центров кристаллизации, подразумевает высокую скоростью роста кристаллов, которая указывает на слабую степень переохлаждения, и наличие крупных зерен. При обратном процессе скорость переохлаждение высока, что ведет за собой увеличение появление центров зерен. Они имеют малый размер зерна, что указывает медленный роста кристаллов [7].

В соответствии с диаграммой фазового равновесия затвердевающего металла и расплава, различаются по составу (и последние порции расплава могут достигать состава легкоплавкой эвтектики). Поскольку кристаллы растут от поверхности к оси слитка, есть разница в составе по его сечению – зональная ликвация [1]. В учебном пособии [11] говорится: «Ликвация, проявляющаяся в объеме отдельных зерен (кристаллитов, дендритов), называется внутрикристаллической или дендритной ликвацией. Если химическая неоднородность наблюдается в объеме всего слитка или отливки, то такая ликвация называется зональной ликвацией». Считается, что ликвация ухудшает многие свойства (механические, коррозионную стойкость и др.), за счет чего является не желательным процессом [12]. Так в кристаллизирующихся интервалах температур, всегда развивается дендритная ликвация – неоднородность химического состава в микрообъемах, соизмеримых с размером зерна [13].

Процесс развития концентрационной микронеоднородности, которая зависит от полноты прохождения при кристаллизации разных по природе процессов на границе кристалл-расплав, внутри расплава и внутри кристалла, называется дендритная ликвация [14,15]. Дендритная ликвация связана с различным содержанием легирующих элементов (и углерода) в литой структуре который приводит к разнице в критической скорости охлаждения аустенита. При одной и той же скорости охлаждения стали в осях дендритов и между ними, можно получить разность структур [16]. В [1], говорится: «Углерод усиливает ликвацию, одновременно перераспределяясь вслед за основными легирующими элементами (после затвердевания), выравнивая свою термодинамическую активность и уходя в объемы с избытком карбидообразователей (W, Mo, Cr, Mn), покидая объемы с избытком ферритообразователя (Si)» [1].

По марочному химическому составу стали можно определить, какие элементы являются легирующими добавками, а какие примеси. Если в марочном химическом составе стали устанавливаются нижний (не менее) и верхний (не более) пределы содержания в стали данного элемента, то он будет легирующим. Как правило, для примесей устанавливается только верхний предел содержания [17]. Все легирующие элементы, помимо марганца, способствуют измельчению зерна. При высокой температуре крупнозернистая сталь имеет более высокий предел длительной прочности и лучше сопротивляется ползучести. Причем у каждой стали при данной температуре существует свой оптимальный размер зерна [7]. Однако возможны различные вариации в пределах поля допуска, где сочетание данных отклонений дает многообразие вариаций влияний.

Неоднородность структур может быть связана с наличием полосчатости структур. В [18] говорится: «Причиной ее появления является химическая ликвация легирующих и примесных элементов при кристаллизации слитка или непрерывно литой заготовки». Основной причиной (полосчатости структуры) которой является разность скорости охлаждения аустенита, который приводит к образованию на осях дендритов (из-за чего и можно получить разную структуру на осях: мартенсит-бейнитная, бейнит-перлитная, феррит-перлитная, и карбидная строчечность в высокоуглеродистой стали). В статье [19] показана полосчатость микроструктуры, которая связана с ликвацией: «Другая причина полосчатости микроструктуры также связана с ликвацией: размещение легкоплавких неметаллических включений (сульфидов и силикатов) внутри ячейки дендрита и «раскатка их в нить» прокаткой. В месте соприкосновения с силикатом аустенит обогащен кремнием, отчего термодинамическая активность растворенного углерода здесь выше, и он отсюда вытесняется. Это приводит к феррито-перлитной полосчатости, в структуре возникают ферритные строчки с нитью силиката на оси ферритной полоски» [19].

Также на разнородность структур влияет критическая температура перехода стали в хрупкое состояние, которая в значительной степени зависит от величины зерна стали. Пластичность малоуглеродистой стали при низких температурах повышается с уменьшением величины зерна, а температура перехода в хрупкое состояние сдвигается в сторону низких температур при измельчении перлита [20]. Увеличение размеров ферритного зерна вызывает повышение порога хладноломкости у мягкой листовой стали. У мелкозернистой стали ударная вязкость при понижении температуры уменьшается плавно, а у крупнозернистой — резко [20]. В книге [21] говорится: «Явление хладноломкости металлов и сплавов с ОЦК-решеткой обусловлено температурной зависимостью предела текучести: рост значения предела текучести при понижении температуры приводит к разрушению материала при напряжениях ниже напряжения начала

макропластической деформации». Это является началом микропластической деформаций которая приводит к локальной концентрации напряжений и зарождению (образованию) хрупкой трещины. Так опасность хрупкого разрушения возрастает с понижением температуры и увеличением скорости деформации, когда недостаточная подвижность дислокаций не обеспечивает возможности релаксации напряжений [21].

Поиск значений температуры вязко-хрупкого перехода, определяется по разбросу ударной вязкости при разных температурах, которые могут повлиять к образованию трещин, скола, которая приведет за собой хрупкий излом. В статье [10], показан большой разброс ударной вязкости при различной температуре в листовой стали 09Г2С (рисунок 1), который отражает разнообразие сценариев эволюции структур и дефектов, находящихся в пределах поля допуска. На рисунке 2 продемонстрировано монотонное снижение ударной вязкости в крупных поковках стали 38ХНЗМФА-Ш, без яркого выраженного порога хладноломкости.

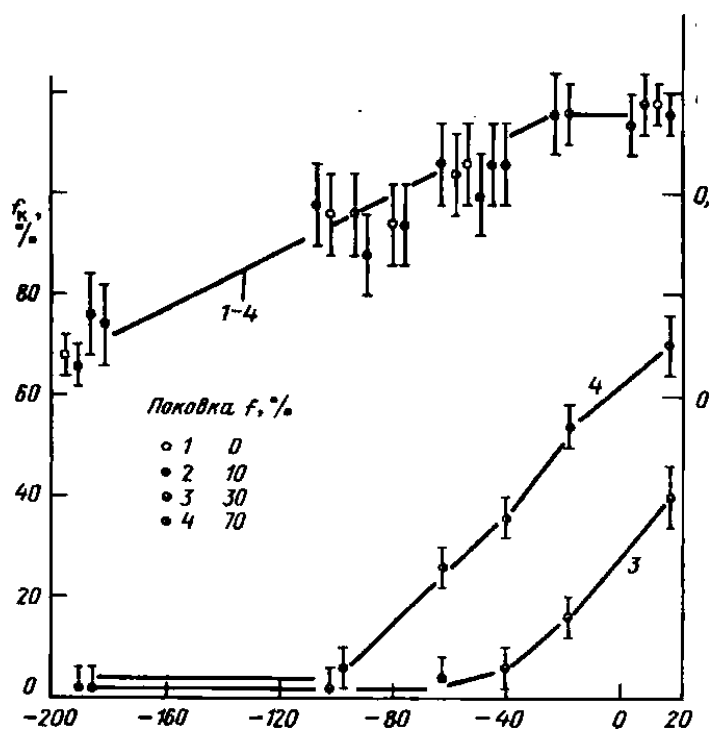


Рисунок 2 - Изменение ударной вязкости стали 38ХНЗМФА-Ш и доли  $f_k$  камневидной составляющей в изломе в зависимости от температуры испытания [10]

В листовых сталях повышение масштаба структуры неоднородности ведет за собой увеличение порога хладноломкости. Это применимо к параметрам геометрии микроструктуры, распределения, которые чаще имеют асимметричный характер распределения [22]. Так в статье [22]: «Показано (рисунок 3), что при отсутствии значимого различия между средними значениями параметров структур и изломов, при вариации балла полосчатости от первого до третьего, статистические характеристики их распределений

(коэффициенты эксцесса  $E_x$  и асимметрии  $A_s$ ) изменяются существенно. При этом максимум величины коэффициента эксцесса  $E_x$  и асимметрии  $A_s$  для толщин полос перлита и размера фасеток наблюдался для партии металла, полосчатость которого в микроструктуре оценивалась вторым баллом», что указывает на проведения оценки строения структур и изломов на основе их статистической природы.

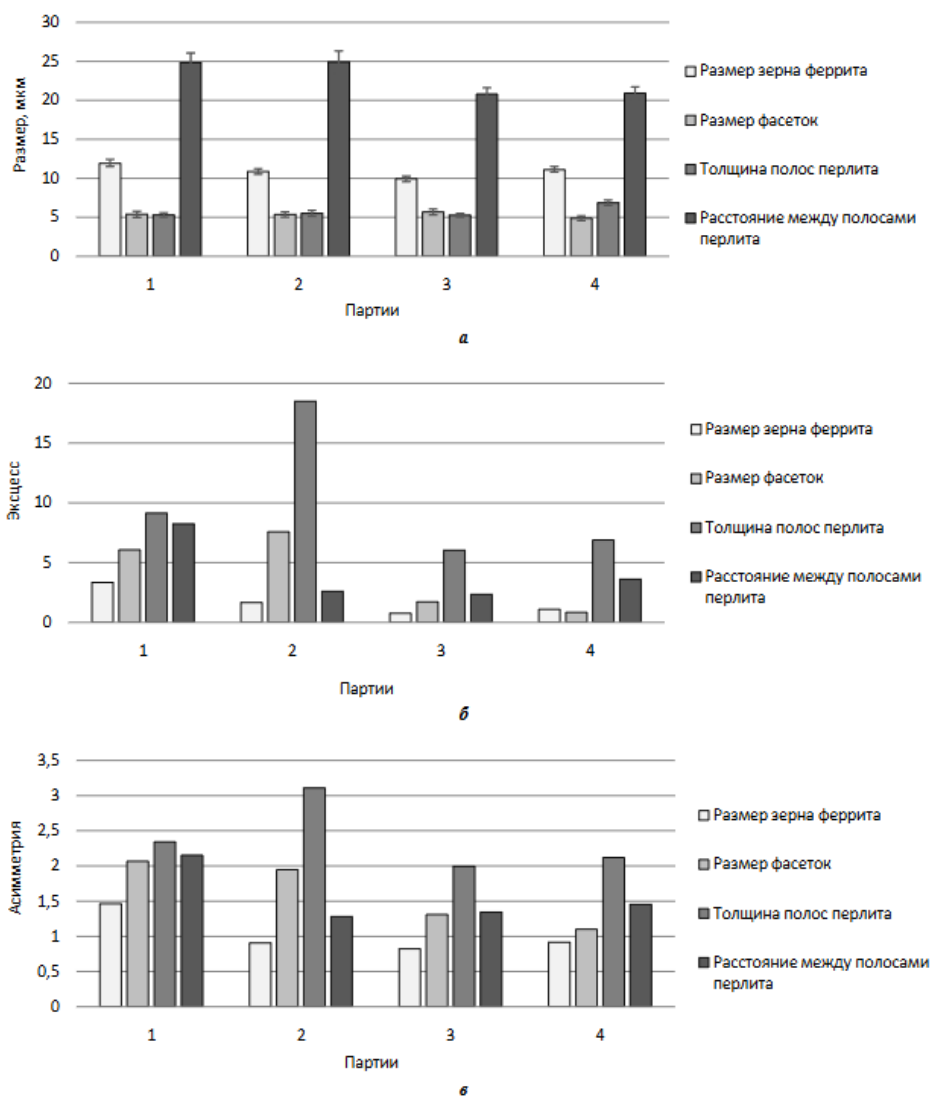


Рисунок 3 - Сопоставление средних значений геометрических параметров полосчатости в микроструктуре (в диапазоне 1–3 балла по ГОСТ 5640): размера зерна феррита, толщины полос перлита и расстояния между ними; размера фасеток в хрупких изломах (а) и статистических характеристик их распределений: коэффициентов эксцесса (б) и асимметрии (в) (ударных образцов, отобранных от четырех партий листовой стали 09Г2С) [22,23]

Главной причиной хладноломкости стали является скопление фосфора на границах зерен, что ухудшает сопротивление хрупкому разрушению структуры, и служит увеличением размера зерна, тем самым упрочняет железо [24,25]. Высокое содержание серы, ведет к образованию сульфидов, которое ведет к охрупчиванию металлоконструкции.

В книге [24], сказано: «Сульфидные включения удлиненной формы, являясь концентраторами напряжений, резко понижают работу распространения трещины», тем самым указывая на риски к появлению хрупкого разрушения металлических конструкций [25].

Такой показатель как хладостойкость, в аттестации массовой продукции оценивается косвенно, по уровню ударной вязкости при отрицательной температуре испытаний. В то же время исходя из того, что контролируется ударная вязкость при различных температурах, не исключено, что из баз данных можно получить дополнительную информацию о параметрах качества металлопродукции. В ряде случаев нужно делать привязку к оценке микроструктуре, для оценки хладноломкости. Расширение такого спектра испытаний позволят получать дополнительную информацию и дать расшифровку полученных результатов по базам данных.

### **1.1.3. Роль «металлургического качества»**

На сегодняшний день увеличения спроса металлопродукции на рынке повлияло на требование к высококачественной металлопродукции, которая должна соответствовать стандартам мирового уровня. Сталь должна быть качественной, прочной и при этом иметь высокие технологические свойства [26]. В книге [1] говорится: «Для потребителя качества проката – это его конечные технологические и эксплуатационные свойства. Они заданы структурой через марочный состав стали. Но и достижимость такой структуры и сопутствующие осложнения определяются металлургическим качеством».

По Мальцевой Л.А. и Гервасьеву М.А. говорится: «Для оценки металлургического качества металла, закономерностей процесса разрушения, влияния структурных, технологических и других факторов на разрушения широко применяют методы фактографии – области знаний о строении изломов. Под изломом понимают поверхность, образующуюся в результате разрушения металла. Вид излома определяется условиями нагружения, кристаллографическим строением и микроструктурой металла (сплава), формируемой технологичней его выплавки, обработки давлением, термической обработки, температурой и средой, в которой работает конструкция» [27]. Это указывает что механизмы оценки качества металлургического качества металла фиксируется в параметрах технологий.

Для повышения качества используют способ переплава, где одним из видов переплава является вакуумно-дуговой переплав (ВДП). Вакуумирования стали происходит в ковше, а точнее при переливе из ковша в ковш, при заливке в изложницу. Происходит это путем закрытие герметичной крышкой, и с помощью насоса происходит разрежение



давления. С помощью вакуумно-дугового переплава, в стали появляются всплывающие пузыри в ковше, это выделяется водород и азот, которые захватывает неметаллические включения. Тем самым уменьшая количества неметаллические включений, и улучшает прочность и пластичность стали. Также для повышения качества металлопродукции применяют электрошлаковый переплав (ЭШП) [28]. За счет проведения электрошлакового переплава происходит уменьшение содержания серы, и неметаллических включений, уменьшение расстояний между осями дендритов, отсутствие улучшения механических свойств при повышенных температурах, улучшение коррозионной стойкости, улучшение пластичности и ударной вязкости [29].

Важную роль в качестве играет вязкость разрушения, которая не зависит от размеров образцов, но чувствует условия испытаний и структурное состояние. Вязкость разрушения или критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$  отражает интенсивность напряжения для момента начала распространения трещины.

Одним из важнейших характеристик качества и свойств металлопродукции является размерность зерна. Крупнозернистая сталь более предрасположена к закалочным трещинам, деформации и короблению. Так рост зерна резко понижает ударную вязкость и увеличивает порог хладноломкости. Разнозернистость стали приводит к понижению конструкционной прочности и вызывает охрупчивание [30]. Это все связано разным количеством примесей в стали. В книге [17] написано: «Согласно классификации, Гудцова Н.Т., примеси подразделяют на постоянные (обыкновенные), случайные и скрытые (вредные)». Так марганец и кремний относятся к постоянным примесям в сталях, имеющихся в промышленных сталях, для перевода серы из сульфида железа в сульфид марганца [17]. К случайным примесям в сталях относятся различные элементы случайно оказавшись в стали из скрапа (лом черных металлов, или зашлакованные отходы из плавильных агрегатов), природно-легирующей руды или раскислителей. Чаще всего данными элементами являются хром, никель, медь, молибден, вольфрам, алюминий [17].

В металлургической технологии существует проблема, связанная с неметаллическими включениями, ликвацией, флокенами. [22,31]. Данные проблемы связаны с малым возмущением номинально одинаковой технологии, в пределах допускаемого разброса параметров процесса (от неблагоприятного их сочетания) или от непредвидимых, но временами повторяющихся сбоев в работе оборудования или в исходных материалах.

Резко сузить разброс обычно не позволяют оборудование и инструментальные средства контроля процесса [1]. Отсюда усиливается контроль за содержанием неметаллических включений, так как являются важнейшим фактором, характеризующим «металлургическое» качество, стали. Неметаллические включения влияют на качество и

свойства стальных изделий [17]. Согласно предложенной классификации Байковым А.А. и Бельченко Г.И., неметаллических включений по природе их происхождения разделены на две группы в зависимости: эндогенные и экзогенные [32]. Бельченко Г.И. говорил: «Образование эндогенных неметаллических включений – неизбежный процесс при производстве стали вследствие реакций между ее компонентами, уменьшения растворимости последних с понижением температуры, добавления в сталь раскислителей и десульфуратов. Момент и место образования включений – гомогенное зарождение в результате ликвации примесей или гетерогенное зарождение на поверхности ранее существовавших включений или на поверхности кристаллов – определяются термодинамическими и кинетическими факторами. На состав эндогенных включений влияют состав, и технология производства стали (способ выплавки, раскисление, рафинирование). Экзогенные неметаллические включения представляют собой продукты разрушения футеровки сталеплавильных агрегатов и сталеразливочных устройств. Состав экзогенных включений близок к составу огнеупоров или шлаков. Экзогенные включения, попадающие в жидкую сталь, подвергаются активному воздействию ее компонентов и в ряде случаев приближаются по составу к эндогенным» [32].

Классификация неметаллических включений является условной, так как во многих случаях включения являются комплексными и состоят из нескольких типов химических соединений [17]. Мелкие неметаллические включения являются фактором, определяющие работу вязкого излома, так как крупные (большие) неметаллические включения являются очагом хрупкого излома только в высокопрочных сталях (где  $\sigma_{0,2} > 200$  МПа) [33]. В статьях [34,35] продемонстрирована новая методика исследования неметаллических включений, для оценки влияния коррозионноактивных включений на коррозию окружающего слоя стальной матрицы. Данная методика основана на основе проведенных электролитической и химической экстракции с использованием слабого 10%-ного электролита АА, где исследование трехмерного состояния неметаллических включений определен характер типичных неметаллических включений в низколегированном прокате данного состава. В статье [36], показано влияние неметаллических включений на приемо-сдаточные параметры, а именно на усталостную прочность для различных групп прочности. Также продемонстрировано влияние размерности длины неметаллических включений на скорость распространение трещины [36].

#### **1.1.4 Технологическая наследственность при производстве материалов**

Наследственность — это передача знаний, навыков, методов и технологий от одного поколения к другому. Это понятие охватывает как традиционные, так и современные

технологии и может применяться в различных отраслях, включая металлургию, машиностроение, строительство и другие.

В статье [37], говорится: «Носителем технологической наследственности выступают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин». Отсюда можно сказать, что проблемы качества металлопродукции основываются на рассмотрении причинно-следственных связей, позволяющих описать всю сложность условий изготовления металлопродукции и следствий приводящих к образованию трещин [38-40].

Технологическую наследственность можно сравнить с известной моделью Вольтерр Вито (модель Лотки – Вольтерра), которая описывает взаимодействие двух видов «хищников» и «жертв». Данную модель можно назвать «эффект последствия», она описывает и указывает состояние объекта, что определяется не только силами, которые действуют на него в данный момент времени, но и историей сил, имевших место в прошлом [41]. Из-за чего оценка технологической наследственности в настоящее время является одним из приоритетных направлений теории и практики оценки живучести конструкций различного назначения [40,42].

Для оценки и выявления закономерностей требуемого качества металлопродукции необходимо знать физико-механические свойства и учитывать технологическую наследственность [43-46]. В статье [40], приводится пример, который говорит нам о том, что, на каждом этапе производства может происходить потери "качества на стыках", отклонения от нормы, которые могут внести отклонения последующих этапах так и из-за наличия внутренних взаимосвязи. В статьях [47,48] наблюдалось выраженная текстурная наследственность, при термической обработке в малоуглеродистой низколегированной трубной стали в результате ТМСР (контролируемая прокатка с последующим ускоренным охлаждением, thermo-mechanical controlled processing).

В статье [49] рассмотрены вопросы влияния технологической наследственности на формирование качества и эксплуатационных свойств деталей машин. За счет чего были предложены математические модели, которые помогают в изучении закономерностей проявления технологической наследственности на определенном этапе производства. Полученные результаты помогли повысить эффективность управления технологического процесса, тем самым увеличилась долговечность деталей машин и надежность работы деталей с сокращением затрат на их изготовление [49].

В статьях [19,50] приводится пример оценки риска появления аномалий вязкого разрушения – камневидного излома, в результате технологической наследственности, на

основе применения цифровых технологий, способных обеспечить прогноз разрушения материалов. Для оценки взаимосвязей было применена непараметрическая статистика и сложные эвристические приемы когнитивной графики, которые предполагали понимание протекания закономерностей технологической наследственности и протекания разрушения металла.

Учет технологической наследственности, происходит не на всех производственных этапах, из-за чего эффективность поиска наследственности падает. Для прогноза вероятности возможных отдаленных последствий малых возмущений (и их неблагоприятных сочетаний) в технологической цепочке и управляющих воздействий может быть эффективен ретроспективный анализ баз данных производственного контроля. Для проведения ретроспективного анализа необходимы статистические алгоритмы их методы обработки, которые эффективны с точки зрения статистической природы рассматриваемых объектов и которые будут учитывать механизмы протекания технологической наследственности [47].

## **1.2 Контроль качества процесса и продукта**

Процесс производства металлопродукции следует определять, как сложную многопроходную технологическую систему с причинно-следственной связью состояний. В работах [51,52] показано, что наличие сложности технологического процесса, имеет за собой большие массивы данных, которые требуют обработки статистическими методами для адекватного представления причин нарушения технологического процесса [52]. При существующих стандартах и нормативных документах, технология получения листового проката представляет заданные механические свойства, так же возможны и дополнительные требования к продукции от потребителей. Данные дополнения могут вносить изменения в физико-механические свойства металлопродукции, которые ведут к дополнительным затратам.

Система контроля за качеством процесса и продукции зависит от управления процессом, который влияет на поддержание высокого уровня качества металлопродукции. Разработка системы качества в основном заключается в том, чтобы сначала, с учетом рекомендаций стандартов ISO-9000, определить состав необходимых функций системы качества, а затем структуры, которые выполняют или будут выполнять эти функции. После этого разрабатываются новые, перерабатываются или используются имеющиеся нормативные документы для выполнения всех функций. На данный момент наиболее распространенным подходом к управлению качеством является создание и последующее внедрение систем менеджмента качества, разработанных на базе стандартов ISO серии

9000. В системе управления качеством можно выделить политику предприятий в области качества, собственно систему качества, включающую обеспечение, управление и улучшение качества.

В книги [53] говорится, что любые отклонения при оценке физических свойств металла, характеризует наличие дефектов, которые влияют на качество металлопродукции. В книге [54] описывается какие методы применяются для оценки неразрушающего контроля. Подробно описаны стандартные методы контроля качества конструкционных металлопродукции, какие существуют виды испытаний, как проводить испытание для определения механических свойств металлов, описываются правила отбора проб, заготовок и образцов (в соответствии ГОСТ 7564–97 с учетом ИСО 185–19, ИСО 1088–76, ИСО 2892–73, ИСО 5922–81).

Важную роль при оценке качества играют методы неразрушающего контроля. Так в ГОСТ Р 56542—2019 [55], приводятся следующие виды неразрушающего контроля: акустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический [55]. Распространёнными методами, применяемыми на производстве являются: акустический неразрушающий контроль, который основан на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. Радиационный неразрушающий контроль, основанный на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Радиоволновой неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом контроля [55].

Основная цель проведения неразрушающего контроля является предотвращение каких-либо дефектов при эксплуатации, посредством повышения качества. Повысить качества можно за счет уменьшения количества неметаллических включений, уменьшении примесей, и контролем качества. С учетом появлением более усовершенствованных компьютерных технологий, стали применять оценки микроструктур и методы когнитивной графики, которые в свою очередь наглядно представляют информацию о структуре и свойствах стальной продукции. Такие методы дают возможность выявить причинно-следственную связь появления трещины (расположение Неметаллических включений), и выявить превалирующие зоны зависимости двух анализируемых параметров, которые можно не заметить или они просто не будут выявлены при методах классической статистики.

## 1.3 Статистические методы для повышения качества металла

### 1.3.1 Статистические распределения и их основные характеристики

В начале XX века научная дисциплина «Математическая статистика», являющаяся частью математики, отделилась и стала самостоятельной научной дисциплиной. Так *Статистика* обрела множеством определений, одно из них — это сбор, обработка, анализ количественной и/или качественных сведений о различных явлениях [56].

В современных учебниках по теории статистики часто приводится следующее определение «Статистика — это научно упорядоченное изображение действительности, вызванное необходимостью совершенствовать искусство управления» [57].

В большой советской энциклопедии другое определение [58]: «Статистика (нем. Statistik, от итал. stato, позднелат. status — государство), вид общественной деятельности, направленной на получение, обработку и анализ информации, характеризующей количественные закономерности жизни общества во всём её многообразии (технико-экономические, социально-экономические, социально-политические явления, культура) в неразрывной связи с её качественным содержанием».

В учебнике [59] говорится: «Статистическая наука выработала приемы и способы изучения массовых общественных явлений, именуемые статистическим методом. Составными частями статистического метода являются статистическое наблюдение, группировка и метод обобщающих показателей».

В пособии [60] приводится другое определение: «Статистика – наука, изучающая количественную сторону массовых общественных явлений с целью установления закономерностей в неразрывной связи с их качественной стороной в конкретных условиях места и времени в их взаимосвязи и взаимозависимости», в связи чем термин, можно интерпретировать в нескольких направлениях. Так в [60] показывается три направления:

1) под статистикой понимают отрасль практической деятельности, которая имеет своей целью сбор, обработку, анализ и публикацию массовых данных о самых различных явлениях общественной жизни (в этом смысле «статистика» выступает как синоним словосочетания «статистический учет») [60];

2) статистикой называют цифровой материал, служащий для характеристики какой-либо области общественных явлений или территориального распределения какого-то показателя [60];

3) статистикой называется отрасль знания, особая научная дисциплина и соответственно учебный предмет в высших и средних специальных учебных заведениях [60].

Статистика опирается на математическую статистику. Так в книги [61] говорится: «Математическая статистика – наука, изучающая методы обработки результатов наблюдений массовых случайных явлений, обладающий статистической устойчивостью, закономерностью, с целью выявления этой закономерности», это говорит нам, что для определения более точных закономерностей математическая статистика будет опираться на теорию вероятности [62]. В математической статистике полагают, что вероятность модели неизвестна и в результате проведенных экспериментов (или наблюдений) получены некоторые экспериментальные данные (статистические данные). На основании полученных данных выбирают соответствующую им вероятностную модель, и затем уже используют полученную модель для описания рассматриваемого явления или процесса [63].

Основой математической статистики является оценка вида распределения. Данный способ помогает описать вероятность распределения случайной величин. Существует множество распределений. В книге [64]. говорится, что: «Распределение вероятностей — это выражение, которое определяет какие значение будет принимать данные параметр и как часто будет встречаться каждое из этих значений (или, в случае непрерывного распределения, как часто будет встречаться данный диапазон значений)».

Распределение вероятностей разделяют на непрерывные и дискретные. Непрерывные принимают любые значение в заданном диапазоне, дискретные только определенные заданные значения. В качестве примера непрерывного диапазона можно привести «Нормальное (Гауссовское) распределение», в примере дискретного можно отнести мультимодальное распределение (относительное отклонение от нормального вида распределения).

Нормальное распределение — это статистический закон, который описывает выпадение или наличие случайной величины в выборке, в зависимости от среднего значения по выборке данных. В книги [64] приводятся характерные свойства для нормального распределения: «Для всех нормальных распределений все зависимости от среднего значения и стандартного отклонения характерны некоторые общие свойства», к ним относятся: симметричность; унимодальность (единственное наиболее частое значение); равенство среднего, медианы и моды. В отличие от нормального распределения, которое симметрично и имеет форму колокола, относительное отклонение от нормального распределения, могут иметь различные формы и характеристики (рисунок 4). Характеристикой определения отклонения распределения является асимметрия – она может быть левосторонней или правосторонней.

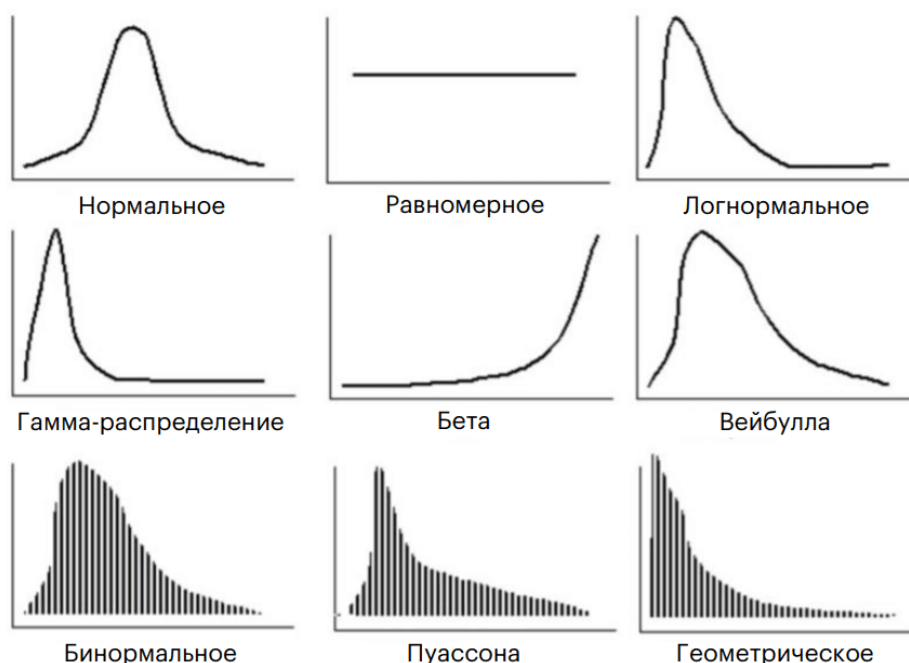


Рисунок 4 - Виды кривых распределений

Также математическая статистика включает в себе параметрические и непараметрические методы. Параметрические методы применяют в анализе экспериментальных данных, основаны на предположении нормальности распределения данных. Непараметрические методы применяют, когда выборка отклоняется от нормального распределения. Тогда как параметрические методы имеют преимущество, для них существуют математический аппарат, однако которому необходимо большой объем данных, что позволяет провести многофакторный анализ (оценка взаимодействия двух и более факторов на изменения признака) [65].

Орлов А.И., ранее писал: «К сожалению, параметрические семейства существуют лишь в головах авторов учебников по теории вероятностей и математической статистике. В реальной жизни их нет. Поэтому современная прикладная статистика и эконометрика используют в основном непараметрические методы, в которых распределения результатов наблюдений могут иметь произвольный вид» [66]. Это связано с отсутствием единого пространство параметров технологий, которое определяется множеством сценариев протекания технологической наследственности, неизбежных с учетом широкого поля допуска. В книги [67] говорится: «Непараметрическая процедура — это статистическая процедура, обладающая определенными желаемыми свойствами, которые сохраняются при относительно мягких предположениях о базовых популяциях, из которых получены данные». Непараметрические параметры обладают рядом характеристик: относительно нечувствительны к выбросам, легки в применении. В работе [68], говорится:



«Непараметрические методы можно применять для качественных данных, представленных в номинальной шкале, или для данных, измеряемых в порядковой шкале, то есть представленных в виде рангов, а также для количественных данных в случаях, когда распределение генеральной совокупности неизвестно». Непараметрические методы статистики зачастую применяются, когда малая выборка, и наблюдается относительное отклонение от нормального вида и нефизическая природа изучаемых явлений. Так в статье [69] показано применение непараметрической статистики и когнитивных графиков при поиске областей с доминирующим типом зависимости, которые позволят улучшить качества за счет сокращения пространства параметров, в виде выделения наиболее значимых параметров.

Классические статистические методы анализа данных могут быть крайне неэффективны, так как каждый из параметров может иметь слабую зависимость между другими параметрами. Из-за чего применение методов когнитивных графиков и непараметрической статистики, для анализа массива баз данных производственного контроля, оказывается более эффективным чем классические методы статистики. Так как они учитывают зависимость между параметрами и помогают определить природу статистического объекта.

### **1.3.2 Практика использования статистических процедур в металлургии**

Статистический анализ способствует улучшению и пониманию степени характера и причин, которые повлекли за собой изменение в выбранных процессах. Применение статистических методов может быть вызвано тем чтобы изучить поведение результатов всех процессов даже если наблюдаются условия, которые стабильны. Это способствует в помощи по предотвращению и решению проблем, связанные с обусловленной изменчивостью. Так в [70], говорится: «Predictive Analytics – совокупность операций, позволяющих прогнозировать результаты некоторых событий в будущем основываясь на закономерностях их развития в прошлом», показывая, что существующая практика подходов к анализу данных производственного контроля при производстве металлопродукции достаточно широка и разнообразна. Однако если не рассматривать вопросы, связанные с оперативным мониторингом контролируемых параметров для каждого вида продукции во всех ключевых контрольных точках, непрерывный контроль, и выявление отклонений в ходе технологического процесса на основе статистических методов (statistical process control - SPC), будут решаться вопросы преимущественно управления технологическим процессом на уровне агрегата [70,71].

Традиционные статистические методы помогают выбрать оптимальные параметры процесса производства, но и имеют недостаток, как нерегулярность и не учёт сложности производственных процессов. Так же существуют проблемы при обработки больших объёмов данных (фильтрация данных, временные затраты, большой вес обрабатываемых файлов) [70]. Так в статьях [72-74], показано необходимость учета статистической природы объектов, при проведении «Big Data» в металлургии. Учет статистической природы позволит получить более полное представление о его производстве (возможностях регистрации информации, характеризующий ход технологического процесса), но и создать условия для прецизионной настройки технологии, в т.ч. в режиме реального времени. В статье [23] рассмотрено применение статистических методов, которые помогли провести количественную оценку изображений неметаллических включений и включающая в себе анализ изображений микроструктур [23].

В работе [75] показано использование статистической модели для оценки роста окалины и передачи травильному агрегату прогнозных значений геометрических параметров окалины, для комбинированного агрегата «стан горячей прокатки полосы» – травильная линия. В статье [76], продемонстрировано применение цифровых технологий при литье заготовок, на основе статистических методов, которые лежат в основе 3D-проектирование. Продемонстрированные методы по обработки баз данных литья заготовки, которые помогают резко сократить сроки подготовки производства любой технологии, за счет повторяемость технологических процессов и обеспечивают гибкость производства и стабильное качество металлопродукции.

В статье [77] продемонстрированы результаты разработки «Модуля разливки» стали в составе Цифровой системы управления качеством в металлургическом производстве (Цифровой системы), осуществляющей контроль и прогнозирование параметров стальной заготовки и технологии ее производства от выплавки до термической обработки. Основа «Модуля разливки» заключается в машинном обучении частных моделей на базе данных, сформированной с помощью математического моделирования, которая позволит сократить время расчетов до нескольких минут. В работе [78], продемонстрирована целесообразность применения статистических методов для поиска случайных величин. Результатом чего явилось: «В частности, воспроизводимость технологического процесса может быть оценена только статистическими методами, которые позволили рекомендовать круг 92A/25A F46 L 6 V20 для шлифования операционной партии деталей штампов» [78].

Основные задачи применения статистики в металлургии является поиск закономерностей в событиях массового характера, которая по отдельности может имеет случайный характер распределения данных. Применяя лишь комплексный подход

статистических методов, можно адекватно оценить причины неоднородности качества металлопродукции. Например, построение хронологических рядов может отобразить тренд, сезонные колебания, массового производства металлопродукции. Построение гистограмм распределения, определить вид распределения. Комплексный подход помогает в принятии оптимальных решений для улучшения качества металлопродукции и учета понимания природы статистического объекта.

### 1.3.3 Применение корреляционного и регрессионного анализа

В научных исследованиях часто возникает необходимость в нахождении связи между результативными и факторными переменными (в нашем случае между управляющими и приемо-сдаточными параметрами). Для достижения данной цели необходимо применять корреляционный и регрессионный анализ.

Зависимость одной случайной величины от значений, которые принимает другая случайная величина (физическая характеристика), в статистике называется регрессией [79]. Для выявления регрессии, первоначально стоит установить значимость связи двух параметров между собой [80]. Для это применяют анализ корреляции, или корреляционной зависимости.

В книге [81], говорится: «Корреляционная связь — это связь, проявляющаяся при большом числе наблюдений в виде определенной зависимости между средним значением результативного признака и признаками-факторами. Если рассматривается связь средней величины результативного показателя  $y$  с одним признаком-фактором  $x$ , корреляция называется парной, а если факторных признаков два и более ( $x_1, x_2, \dots, x_m$ ), корреляция называется множественной».

Корреляция рассматривается как признак, указывающий на взаимосвязь ряда числовых последовательностей. Иначе говоря, корреляция характеризует силу взаимосвязи в данных. Если это касается взаимосвязи двух числовых массивов  $x_i$  и  $y_i$ , то такую корреляцию называют парной [79,80].

Результаты корреляционного анализа могут быть представлены в текстовом и графическом видах [80]. В первом случае они представляются как коэффициент корреляции ( $R$ ), во втором - в виде когнитивного графика. Формула расчета парной корреляции [79]:

$$r = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}$$

Используя специальные табличные соотношения можно дать качественно-количественную оценку взаимосвязи двух сравниваемых совокупностей (таблица 1).

Таблица 1 - Качественная оценка тесноты связи [79]

Величина коэффициента парной корреляции	Характеристика связи
До 0,3	Практически отсутствует
0,3 - 0,5	Слабая
0,5 - 0,7	Заметная
0,7 - 0,9	Сильная
0,9 - 0,99	Очень сильная

При отсутствии корреляции между параметрами точки на диаграмме расположены хаотично, средняя степень связи характеризуется большей степенью упорядоченности и характеризуется более-менее равномерной удаленностью нанесенных отметок от медианы [81]. Сильная связь стремится к прямой и при  $R$  равен 1 точечный график представляет собой ровную линию. Обратная корреляция отличается направленностью графика из левого верхнего в нижний правый, прямая — из нижнего левого в верхний правый угол. Таким образом, корреляционный анализ позволяет сделать вывод о силе взаимосвязи между парами данных  $x$  и  $y$ , а регрессионный анализ используется для прогнозирования одной переменной ( $y$ ) на основании другой ( $x$ ). Иными словами, в этом случае пытаются выявить причинно-следственную связь между анализируемыми совокупностями [79].

Регрессионный анализ – статистический метод, используемый для исследования отношений между двумя величинами, то есть анализ дает предсказание (прогнозирование) одной переменной на основании другой [80]. Регрессионный анализ изучает роль между двух переменных, одной из которых является аргументом, а вторая фикцией. Переменная, которая прогнозируется (функция), обозначается как  $y$ , а переменная, которая используется для такого прогнозирования (аргумент или фактор), – это  $x$  [79]. В отличие от строгой функциональной зависимости  $y$  равен  $f(x)$  в регрессионной модели одному и тому же значению величины  $x$  могут соответствовать несколько значений величины  $y$ , иными словами, при фиксированном значении  $x$  величина  $y$  имеет некоторое случайное распределение [82].

Регрессионный анализ используется для определения общего вида уравнения регрессии (наиболее часто используется линейная модель), оценки параметров этого уравнения, а также проверки различных статистических гипотез относительно регрессии.

Регрессионная модель основана на предположении о том, что величина  $x$  является контролируемой величиной, значения которой задаются во время эксперимента, а величина  $y$  является наблюдаемой в ходе эксперимента. В аналитической химии линейный регрессионный анализ используется при построении градуировочной модели. В качестве величины  $x$  выбирается содержание определяемого компонента (которое является

установленной величиной для серии образцов сравнения), а в качестве наблюдаемой величины  $y$  выступает аналитический сигнал, который подчиняется случайному распределению [82]. Необходимо отметить, что в том случае, если величина  $x$  также является случайной, то для изучения связи между величинами используются методы корреляционного анализа.

В аналитической химии также применяется множественный регрессионный анализ - при исследовании многомерных зависимостей (например, при построении многокомпонентной градуировки и т.д.). Ниже представлено уравнение, по которому оценивают линию простой (парной) линейной регрессии [83].

$$Y = a + bx$$

Парную линейную регрессию можно расширить, включив в нее более одной независимой переменной, в этом случае она известна как множественная регрессия [83]. В таком случае математическая модель процесса представляется в виде уравнения регрессии с несколькими переменными величинами, т.е.  $y = f(b_0, \dots, x_k)$ .

Общий вид уравнения множественной регрессии обычно стараются представить в форме линейной зависимости [79]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Полученное уравнение множественной регрессии, коэффициенты которого  $b_i$  формально показывают, как и в каком направлении действуют (пока лишь вероятно!) исследуемые факторы  $x_{ki}$  и какой процент изменчивости функции  $y$  объясняется влиянием именно этих факторов. Таким образом можно определить статистическую значимость полученного аналитического выражения. Так при проверке значимости модели принято придерживаться следующей последовательности действий [79]:

1. Сначала выполняется общая проверка полученного уравнения на пригодность;
2. Если результат оказался положительным (уравнение значимо), то проверяют на значимость уже каждый коэффициент уравнения регрессии  $b_i$ ;
3. Дается сравнительная оценка степени влияния каждого из анализируемых факторов  $x_k$ .

В статье [84], продемонстрировано применение регрессионного анализа напряженно-деформированного состояния металлических многогранных стоек. Результатом проведенного исследования явилось определение допуска конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние металлических многогранных стоек, которые были внедрены в проектирование и изготовление конструкций на существующее предприятие. В статье [85] продемонстрировано применение регрессионной модели, которая показала свою неэффективность. Причиной этого являлся разброс

химического состава, разность окружности труб, большой разброс нагрева и охлаждения при термообработке. При этом предложенные модели имеют единый недостаток в невозможности применения решений для других марок стали [85].

Существенным недостатком регрессионного анализа является то, что в нем не учитывается совместное влияние факторов, поэтому этот метод классической статистики неэффективен для выявления критических параметров технологии [86]. Так же применение регрессионного и корреляции применяются лишь на конкретном этапе производстве и не работают при проведении сквозного анализа всей технологического процесса производства.

### **1.3.4 Алгоритмы Big Data и машинного обучения**

Множество компаний в настоящее время повсеместно используют информационные технологии, которые накапливают и обрабатывают большие массивы данных. Количество данных настолько много, что эффективно использовать накопленные данные затруднительно. Из-за чего появляются новые инструменты и методы обработки, которые ускоряют процессы обработки больших данных (Big Data), и могут использоваться в поиске решений по управлению качеством металла [87,88].

Big Data или большие данные — это структурированные или неструктурированные массивы данных большого объема [89]. Большие массивы данных могут быть полностью структурированными (таблицы баз данных или электронные таблицы Excel), частично структурированными (XML-файлы, веб-страницы) и неструктурированными (аудиофайлы, изображения) [89,90].

Для обработки больших данных в различных областях применения (экономика, промышленность, государственное управление, логистика и т.д.), нет эффективного адекватного инструментария. Это связано с тем, что под каждую поставленную задачу моментом является не отсутствие инструментария для решения, а что для той или иной отрасли, фирмы, для конкретного случая, может отсутствовать ресурсы (финансы, знаний и др). Так крупные международные компании ProjectPro, McKinsey & Company, Ernst & Young (EY) Consulting, KPMG Advisory занимающаяся решением проблем мировых корпорации, приводит четыре основных метода анализа Big Data [90,91]:

1. Описательная аналитика (descriptive analytics);
2. Прогнозная или предикативная аналитика (predictive analytics) — помогает спрогнозировать наиболее вероятное развитие событий, на основе имеющихся данных;
3. Предписательная аналитика (prescriptive analytics) — следующий уровень по сравнению с прогнозной;

4. Диагностическая аналитика (diagnostic analytics) — использует данные, чтобы проанализировать причины произошедшего.

Обработка больших массивов данных и анализ проводится при помощи следующих инструментов и технологических программ:

- Специальное программное обеспечение (ПО): SQL, MapReduce, Hadoop, R;
- Data mining — извлечение из массивов ранее неизвестных данных с помощью большого набора техник (Python, R, SAS, MYSQL, Excel);
- Искусственный интеллект (ИИ) и нейросети — для построения моделей на основе Big Data, включая распознавание текста и изображений. С помощью Big Data и искусственного интеллекта компания анализирует клиентский опыт и предлагает персонализированные продукты и сервисы;
- Визуализация аналитических данных — анимированные модели или графики, созданные на основе больших данных (основные программы: Excel, Tableau, Power BI, QlikView, Google Data Studio, Yandex DataLens).

Для обработки больших массивов данных в режиме реального времени, необходимы СверхЭВМ (суперкомпьютеры). Данные компьютеры превосходят компьютеры общего пользования своими техническими параметрами.

#### **Машинное обучение – искусственный интеллект**

Машинное обучение — это раздел информатики, посвященный созданию алгоритмов, опирающихся на набор данных о каком-либо явлении. Эти данные могут быть получены из естественной среды, созданы вручную или сгенерированы другим алгоритмом [92].

Машинное обучение является основополагающим элементом искусственного элемента, так как на основе данных искусственный интеллект учится и на полученных результатах совершенствуется, основываясь на полученном опыте. В процессе работы машинное обучение, а точнее алгоритмы занимаются поиском закономерностей и корреляции в больших массивах данных, на основе которых предоставляют оптимальные решения задач и прогнозы [93].

Первое машинное обучение было представлено программой по игре в шашки в 1959 году американским программистом из IBM Артур Самуэл. Данная представленная программа играла сама с собой и обучалась самостоятельно. Позже в 80-х годах аспиранты университета Карнеги-Меллон представили компьютер для игры в шахматы ChipTees, на основе которого со временем был создан суперкомпьютер Deep Blue, который смог обыграть Гарри Каспарова в 1996 году. Ранее шахматисты специально жертвовали свои фигуры, чтоб получить преимущество, так как компьютеры не могли обладать интуицией

и импровизацией. Суперкомпьютер Deep Blue, смог просчитать ход Каспарова, когда Гарри «подставил» фигуру. Вместо того чтоб забрать фигуру, он сделал ход другой фигурой. Данные действия вызвали шок, ведь никто не ожидал, что машина сможет просчитать тактику противника и среагировать так, как среагировал бы человек [94]. После это понадобилось больше 10 лет, чтоб у машинного обучения появилось новая стадия развития. В 2012 году несколько команд Google активно начинают заниматься проектами, которые связаны с нейросетями и искусственными интеллектами (ИИ). Компании Amazon и Microsoft представили платформы, основанные на машинном обучении лишь через три года после Google, а Facebook внедрила в работу DeepFace — алгоритм, умеющий распознавать человеческие лица [94].

В статье [95] продемонстрирован анализ научных публикаций, связанных с применением искусственного интеллекта при работе с ПКМ (полимерные композиционные материалы). Общий объём публикаций приходится на «эксплуатационные характеристики» (54% от общего числа), за которыми следуют публикации «свойства» (19%), «структура» (14%) и наконец, «производство» (13%) [95]. Методы искусственного интеллекта применяются при производстве полимерных композиционных материалов, в процессах укладки волокон. Также в статье продемонстрированы результаты процентного соотношения [95]: «Методы машинного обучения используются в 78% программных комплексов, при этом в более чем 44% программных комплексов преобладает применение искусственных нейронных сетей. У 22% программных комплексов используются сверточные нейронные сети в качестве метода глубокого обучения» [94,95].

Машинное обучение и глубокое обучение в последние годы являются областями искусственного интеллекта, которые широко используются в различных областях, от исследований до непосредственного применения в промышленности. Данные обучения строятся на алгоритмах, цель которых строится на самообучении и полученных на собственном опыте результатов для выполнения поставленных задач [95]. За счет чего глубокое обучение только недавно начало демонстрировать результаты — это связано с ростом вычислительных мощностей необходимых для обработки данных. Данное обучение позволяет обрабатывать сложные и громоздкие большие массивы данных, которые могут быть представлены в доступном виде (визуализация в графической форме: графики, диаграмма, или дашборды) [96-99]. Всего выделяют три метода применения машинного обучения [95, 100]: обучение с учителем (контролируемое), обучение без учителя (неконтролируемое, или спонтанное) и обучение с подкреплением:

1. Обучение с учителем – обучение, где используются уже заранее готовые данные с ответами, где главной задачи обучения понять почему предлагаемый ответ на заданный



вопрос правильный. В книги [95], описывается цель, как: «Цель алгоритма обучения с учителем — на основе набора данных создать модель, которая принимает вектор признаков  $x$  на входе и возвращает информацию, которая позволяет определить метку для этого вектора признаков». Примером может служить модель, созданная на данных людей больных раком, с самого начала их болезни, которая сможет принимать признаки, и выдавать что этот человек болен раком. Еще одним примером применения обучения с учителем является камеры на скорость. Камера фиксирует автомобильный номер и считывает скорость, если скоростной порог превышает разрешенный, тогда он выписывает штраф [95];

2. Обучение без учителя – обучение, где нет никакой оценке. На примере анализа интернет-магазина нужно проанализировать пользователей по их поведению и выявить тех, кто чаще всего покупает те или иные товары.

3. Обучение с подкреплением – обучение, где полученный ответ программы будет зависит от действий другого пользователя. Самый простой пример — это боты в шашках или шахматах. Боты пытаются принимать решения от действий оппонента. Так работал суперкомпьютер, который обыграл Каспарова, один раз он принял тактический ход где Каспаров пожертвовал фигуру. Но второй раз обучение уже учла прошлое и сумела проанализировать действие и последствие [100].

Применение машинного обучения с учителем или без может включать в себя несколько входных, выходных и скрытых слоев — это называется «Глубокое машинное обучение». Данный метод основывается на алгоритмических структурах (нейронные сети), которые помогают в обработке сложных задач, при которых обычно требуется человеческий интеллект (перевод документов, перевод звуковой файл в текстовый формат и т.д.). В статье [101] показано применение машинного обучения непосредственно на производстве, а именно на АО «ЕВРАЗ ЗСМК». С помощью машинного обучения который основывается на статистических алгоритмах, получилось проанализировать и установить взаимосвязи входных и выходных переменных значений. Продемонстрированы линейные и нелинейные зависимости, которые были интегрированы в систему математического моделирования СММ «Прогноз» АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [102].

В металлообработке для повышения точности прогноза спроса нашли применение новейшие самообучающиеся системы (алгоритмы), на основе которых прогностические модели тестируют на архивных данных, а последующую их корректировка происходит с целью дальнейшего повышения точности прогноза на основе текущих практических результатов [103].

Для задач прогноза используют различные физические модели. Пример, прецизионной настройки температуры в конверторе при рафинировании металла, в компании Hüttenwerke Krupp Mannesmann была разработана температурная модель, которая использует всю важную информацию для оценки температуры расплава и её прогноза и постоянно актуализирует результаты расчетов на основе непрерывного получения информации о текущих значениях температуры [104]. Прогноз температуры и содержания углерода в жидкой стали в конце продувки (кислородно-конверторный процесс), а также расхода кислорода и охлаждающих добавок по ходу продувки, в качестве обучающего массива данных для нейронной сети используют результаты фактических замеров температуры и определения углерода в образцах, отобранных по окончании продувки [105]. Искусственные нейронные сети в т.ч. можно использовать для моделирования нормированных механических свойств конструкционных сталей [105,106]. Так в статье Колобкова А.С. и Гуляева И.Н. показан новый подход для разработки новых полимерных композиционных материалов, основанный на искусственном интеллекте. В статье описываются различные варианты применения искусственного интеллекта (методы машинного обучения и глубокое машинное обучение — нейронные сети) при подходе к материаловедению и инженерных задачах. Представленный вывод показывает, что новый подход позволит ускорить создание новых полимерных материалов, обладающих новыми качествами [95].

### **Возможности нейроинформатики**

Нейроинформатика связана с разработкой устройств переработки информации на основе принципов работы естественных нейронных систем [107]. Суть применения нейроинформатики это разработка методов создания (синтеза) нейронных сетей, который решают сложные задачи. Например, структура Нейрона выглядит как усилитель с большим количеством входов и одним выходов.

Ранее Горбань А.Н. писал: «Устройства нейроинформатики представляют связевые системы. В отличие от цифровых микропроцессорных систем, представляющих перед собой сложные комбинации процессорных и запоминающих блоков, нейропроцессоры содержат память, распределенную в связях между очень простыми процессорами. Тем самым основная нагрузка на выполнение конкретных функций процессорами ложится на архитектуру системы, детали которой в свою очередь определяются межнейронными связями» [107]. В своей теории Теуво Кохоненом предложил класс нейронных систем, которые самоорганизующиеся отображение состояний, сохраняющие топологию сенсорного пространства.

Существования различных теории могут представлять риски, которые несут в себе сознательное или бессознательное жульничество (достоверность предоставляемой информации). Это связано лишь с финансовой выгоды, манипуляций обществом и т.д. Но время от времени, применение нейросетевых сетей решают поставленные задачи лучше, чем изощренные статистические методики. Горбань в своей книги привел методы для решения задач нейронными сетями [107]:

1. Классификация (с учителем) (персептрон Розенблатта);
2. Ассоциативная память (сети Хопфилда);
3. Решение систем линейных уравнений (сети Хопфилда и их обобщения);
4. Восстановление пробелов в данных (сети Хопфилда и их обобщения);
5. Кластер-анализ и классификация (без учителя) (сети Кохонена).

Одним из новых и сильно развивающихся направлением является физика высоких энергий (элементарные частицы). Данное направление изучается физикой элементарных частиц строение и поведение элементарных частиц. В задачах данной науки необходимо в огромном потоке данных от многочисленных датчиков сигналов от элементарных частиц в детекторах ускорителей разного рода, найти комбинации данных, означающих наличие определенных известных или предполагаемых событий. Для предварительной обработки информации выполняется нейропроцессорами, "натренированными" методами численного моделирования соответствующих процессов на поиск заданных событий [107].

Возможности применения нейроинформатики в инженерных системах является перспективным направлением. Нейронные сети позволят обрабатывать большие массивы данных, и решать обратные и комбинированные поставленные задачи с локальной оценкой точности. В статье [108] показано применение нейросетевых моделей для анализа технологического литейного производства. Предложенная модель определила характеристики технологий производства для заданных геометрий и размеров при литье, определяя скорость заливки, температуру металла, положение отливки и т.д. Предложенные результаты основывались на самообучении разнородных предложений. Также в статье говорится: «Однако при автономной работе нейронные сети не могут обеспечить готовые решения. Их необходимо интегрировать в сложные системы. В частности, комплексную задачу можно разбить на последовательность относительно простых, часть из которых может решаться нейронными сетями», что подтверждает применение нейронных сетей на конкретном технологическом этапе производства. В статье [109] показано применение нейронных сетей для анализа микроструктуры металла, на основе обработки изображений, поделённые на сегменты, которые определяли границы и размерность зерен. Отсюда можно сказать, что нейронные сети неэффективны при

проведении сквозного (ретроспективного) анализа, для выявления технологической наследственности и причин неоднородности качества металлопродукции.

#### **1.4 Возможности применения непараметрической статистики и когнитивной графики**

Методы когнитивных графиков и непараметрической статистики, показывают, что анализ массива баз данных производственного контроля оказывается более эффективным чем классические методы. Классические методы анализа данных могут представлять собой крайне неэффективность, так как каждый из параметров может иметь слабую зависимость между другими параметрами [110].

Когнитивная графика — это совокупность приемов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения [111].

В книге Руонина сказано: «По сколько непараметрические критерии значимости не требуют предварительны предложений относительно вида исходного распределения, их обычно называют критериями значимости, не зависими от распределения» [112]. Так применение непараметрической статистики основывается на отклонение от нормального распределения, и не проводит оценку параметров среднего значения или стандартного отклонения. Непараметрическая статистика проводит для выявления различия между группами (выборками) [110,112].

Непараметрическую статистику и когнитивные графики применяют также в различных сферах, а именно непараметрических методы применяют в медицинской статистике. Так в [113] показано применение непараметрических методов при проверке гипотезы о равенстве внутрибольничной смертности с острым нарушение мозгового кровообращения» (ОНМК). Проблемы применения непараметрических методов в медицины показывают работу не с исходными значениями, а с рангами. Вне зависимости от того, как было распределена исходная случайная величина, ранг ее распределен известным образом, он принимает значения 1, 2, 3, ..., N, то есть распределение рангов известно заранее и «хорошее» [113].

При переходе от исходных значений к рангам значительная часть исходной информации пропадает бесследно, так как ранги значений указывают лишь на то, какое значение больше, но не указывают, на сколько больше. Поэтому ранговые методы, или методы непараметрической статистики, следует использовать для подстраховки. Например, если из-за недостаточного размера групп или большого коэффициента эксцентриситета

корректно сравнить средние по группам нельзя, можно рассчитать достоверность различия средних рангов.

В психологии непараметрическая статистика активно применяется для выявления различий между выборками. В статье [114], рассматривались условия применения непараметрических методов для получения объективных результатов, а именно:

- есть основания считать, что распределение значений признака в генеральной совокупности не соответствует нормальному закону [114];
- есть сомнения в нормальности распределения признака в генеральной совокупности, но выборка слишком мала, чтобы по выборочному распределению судить о распределении в генеральной совокупности [114];
- не выполняется требование гомогенности дисперсии при сравнении средних значений для независимых выборок [114].

В экономике активно применяется непараметрическая статистика для оценки результативности кадров, для обнаружения микро- и макроэкономических показателей, которые необходимы для поиска взаимосвязи между происходящими явлениями и процессами. В большинстве статистических исследований микро- и макроэкономических показателей необходимо обнаружить имеющиеся взаимосвязи между происходящими явлениями, процессами [115]. Так наиболее распространёнными критериями, используемыми в экономике, являются: G-критерий знаков; T-критерий Вилкоксона. Данные критерии дают возможность оценить внешний или внутренний фактор, который может оказывать влияние на формирование исследуемой величины [116].

В метрологии для определения температуры используют градусник, который применяет ранговый метод непараметрической статистики. При анализе карт температур применяют корреляционный метод и когнитивные графики, которые помогают сделать тепловую карту местности.

В статье [69] показан один из вариаций применения когнитивной графики при выборе областей с доминирующим типом зависимости, для анализа данных производственного контроля. Показан низкий уровень прогноза по регрессионной модели, который связан с различием вида распределения выборок и отсутствием единого пространства параметров процесса и продукта. Из-за чего можно говорить про неэффективность множественной регрессии для выявления параметров технологии. В [71] продемонстрировано оценка закономерностей изменения параметров технологии свойств при помощи построения хронологических рядов. Исследование проводилось с помощью кросс-спектрального анализа Фурье, который помог выявить закономерности взаимосвязанных изменений выходных и входных параметров. В работе [117] показано

применение когнитивной графики в астрофизики на основе анализа галактики (каждая галактика представляет перед собой точку с 44-мерной пространством параметров). Для которых были рассчитаны угловые размеры, оценена яркость звездных величин и другие характеристики, для получения многомерного явлений. Применяв когнитивные графики, был получен новый образ проецирования исходных многомерных данных с учетом различных размеров объектов, разностью цветов и отсутствием связи между характеристиками. Отсюда можно сказать, что для проведения полного цикла анализа данных нужно проводить количественную оценку статистическими методами, для выявления взаимосвязей в многофакторном анализе галактик. На сегодняшний день многогранность применения непараметрической статистики и когнитивной графики является актуальным при визуализации больших объёмах неструктурированных данных, которые облегчат решение поставленных задач на предприятии.

## **1.5 Выводы по аналитическому обзору литературы**

1 Качество метала определяется совокупностью параметров, это не только состав легирующие элементы, параметры технологии, колебания легирующих элементов в рамках предела поля допуска марочного состава, в пределах поля допуска колебания значений технологических параметров, особенности проявления и явление технологической наследственности в широком спектре, потеря качества на стыках технологических этапов. Все это содержится в базах данных заводского контроля в режиме реального времени, это определяет интерес технологического анализа, для выявления закономерностей формирования неоднородности качества металлопродукции.

2 Неоднородность качества находит своё отражение в проведении статистического анализа с использованием в последнее время современных цифровых решений, однако пока удовлетворительного результата получить не удалось. Наблюдаются лишь отдельные результаты или упоминания об успешных результатах отдельными этапами управления, а вот с точки зрения сквозного управления качеством пока нет достижений с учетом наличия современных цифровых решений (машинное обучение, нейросети и т.д.).

3 При проведении статистическом анализе происходит не учет статистической природы объекта, применяя современные методы регрессионный, корреляционный и прочее. Оно рассчитано на определенную структурированную и сформированную по определенном законом базу данных, а на практики наблюдается разнотой (отклонение от нормального распределения, бимодальное и прочее). Не учёт всего этого обстоятельства затрудняет и снижает эффективность проведения статистического анализа, что осложнено технологической наследственностью в связи многократностью технологических этапов.

4 Не учет технологической наследственности, так как она порождает разнообразность морфологии номинально однотипных структур (феррито-цементитная смесь), но строение её различны. Поэтому стандартные методы оценки достаточно грубые и не учитывают многообразие структур. Учет технологической наследственности важен с учета понимания разрушения материала, и методы контроля изломов помогают получить полезную информацию о причинах неоднородности качества.

## **1.6 Постановка задач исследования**

1 Оценка границы эффективности классической статистики и её параметров для анализа баз данным производственного контроля на примере технологий получения листовой стали 15ХСНД, 13Г1С-У, 09Г2С, и улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш;

2 Оценка рисков потери информации, связанные с уменьшением количества образцов, используемых для определения качества единицы металлопродукции в рамках штатной аттестации её качества (на примере: баз данных металлопродукции из стали 13Г1С-У, и улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш);

3 Оценка проведения ретроспективного анализа репрезентативных выборок данных производственного контроля процессов получения на примере улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш, и листовых сталей 13Г1С-У и 09Г2С (от 342 до 1000 партий), в рамках, штатных технологических процессов;

4 Разработка и апробация приемов когнитивной графики, обеспечивающих выделение областей с доминирующим типом зависимости при оценке хладноломкости на примере стали 38ХНЗМФА-Ш;

5 Оценка совместного влияния параметров технологии (в пределах поля допуска технологии) на разброс хладноломкости на примере стали 38ХНЗМФА-Ш.

6 Проведение оценки эффективности применения когнитивных графиков для определения высокой и низкой хладостойкостью с использованием приемов когнитивной графики на примере улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш.

## Глава 2. Объекты и методика исследования

### 2.1 Объекты исследования

Объектами исследования являются базы данных технологического процесса получения металлопродукции из сталей 38ХНЗМФА-Ш, 40ХМФА, 09Г2С, 13Г1С-У и 15ХСНД. Исследуемый массив должен быть однородно заполнен структурирован, это означает что все элементы массива помогут дать объективную оценку качества металлопродукции. В противном случае если данные будут заполнены не корректно или отсутствовать, могут возникнуть сложности при выявлении оценки и полученные данные как результаты могут оказаться некорректными [118].

Базы данных производственного контроля представляли собой матрицу  $A_{m \times n}$ , где строкам  $m$  соответствовало количество плавов (партий/поковок), столбцам  $n$  – значения технологических параметров ( $n_i$ ) и характеристик качества металлопродукции ( $n_q$ ). Так количество строк  $m$  в матрицах (с привязкой к химическому составу) составило 342 (из 40 мартеновских плавов), 190, 530 и 1460 (выплавка в конверторе и электродуговой печи соответственно), 520 и 516 соответственно, что представляло собой объем однородной продукции, произведенной в течение одного-двух лет. Количество столбцов  $n$  в матрицах составило ( $n_i/n_q$ ) 91/20, 18/17, 84/15, 33/16 и 83/15 соответственно [118].

Выходные параметры включали в себя, в частности, значения пределов прочности ( $\sigma_B$ ), текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), относительного удлинения ( $\delta$ ), и ударной вязкости (КСУ/КСV), полученные при различных температурах испытания. Тангенциальные образцы для механических испытаний из поковок стали 38ХНЗМФА-Ш вырезались из торцевых темплетов с максимальным  $D_l$  и минимальным  $D_s$  диаметром, по два образца на каждую температуру испытания: на растяжение (при +20 °С) и удар (при +20 и -50 °С). В листовой стали 13Г1С-У от каждой партии отбиралось по одному поперечному образцу на растяжение (при комнатной температуре) и по три поперечному ударных образца (КСУ и КСV) для испытаний при температурах -40 и 0 °С соответственно. База данных производственного контроля листовой стали 15ХСНД, включающая в себя данные по управляющим (температура в первой, второй, третьей печи, температура прокатки) и приемо-сдаточным параметрам, которая содержит информацию о листах толщиной 12 и 32 мм. Приемо-сдаточные параметры включали в себя испытания на растяжение (по два образца на партию с определением характеристик прочности и пластичности) и на ударную вязкость (КСУ) при температуре -60 °С – один образец от тех же партий.



## 2.2 Статистические методы

В курсе общей теории статистики принято условно различать описательную и аналитическую статистику. Описательная статистика преимущественно связана с планированием исследования, сбором информации и представлением полученных результатов в виде статистических показателей. Удобная форма представления статистической информации – таблицы, графики. Задача аналитической статистики – выявить причинные связи, оценить влияние исследуемых факторов и сделать надлежащие выводы, на основании которых могут быть приняты ответственные решения. Часто исследуемый процесс представляется в аналитической форме, т.е. в виде уравнения (эмпирической формулы) [79].

**Описательная статистика.** Целью описательной статистики является общее представление о выборке и оценить ее основные параметры, считая все наблюдения независимыми и равноточными [119]. В описательную статистику входят такие методы как определением среднего значение по выборке, по формуле [120]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i$$

Выборочная дисперсия – оценка дисперсии генеральной совокупности  $\sigma_x^2$  [120],

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Выборочное стандартное отклонение – оценка стандартного отклонения генеральной совокупности  $\sigma_x$ ,

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Стандартная ошибка или ошибка среднего рассчитывается по формуле:

$$s = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

Стандартная ошибка характеризует возможное отклонение от среднего значения, полученного исследуемой ограниченной выборке и от истинного среднего значения, полученного по всей выборки. Ведь объём данных может иметь любое реальное распределение, которое можно изобразить схематически в виде кривой, воспроизводящей основные особенности данного распределения [120].

Одним из способов представления статистических данных в графическом виде в виде столбчатой диаграммы применяют «гистограмма распределения». Гистограммы

отображают распределение отдельных измерений параметров изделия или процесса. Иногда ее называют частотным распределением, так как гистограмма показывает частоту появления измеренных значений параметров объекта [120]. Высота каждого столбца указывает на частоту появления значений параметров в выбранном диапазоне, а количество столбцов – на число выбранных диапазонов.

Важное преимущество гистограммы заключается в том, что она позволяет наглядно представить тенденции изменения измеряемых параметров качества объекта и зрительно оценить закон их распределения. Кроме того, гистограмма дает возможность быстро определить центр, разброс и форму распределения случайной величины. Строится гистограмма, как правило, для интервального изменения значений измеряемого параметра [119]. Также одним из графических форматов изображения применяют кривые распределения, которые понимаются в виде непрерывной линии изменения частот, функционально связанных с изменением вариантов. В зависимости от вида кривых, изображающих распределение, выделяют несколько основных типов распределения [121]:

- одновершинные;
- многовершинные.

Одновершинные распределения – это когда от центральной вершины убывают другие частоты по мере удаления от центрального. Если частоты убывают слева и справа от центрального значения одинаково, то такие распределения называются симметричными. Если частоты убывают слева и справа от центра распределения с разной скоростью, то такие распределения называют асимметричными. В зависимости от того, какая ветвь кривой распределения вытянута, различают правостороннюю асимметрию и левостороннюю асимметрию [119]. Относительно асимметрии важно знать, что многие статистические методы требуют, чтобы данные имели нормальное распределение. Если метод применяется к несимметричным рядам, то полученный результат будет неточным или же просто ошибочным [119].

Многовершинность распределения имеют множества вершинных частот, что свидетельствует о неоднородности изучаемого явления. В этом случае необходимо произвести перегруппировку данных с целью выделения более однородных групп.

Для определения общего характера распределения применяют вычисление показателей асимметрии и эксцесса. Для характеристики степени асимметрии пользуются коэффициентом асимметрии [62]. Более точным является коэффициент асимметрии, рассчитанный как отношение центрального момента третьего порядка ( $\mu^3$ ) к среднеквадратическому отклонению третьей степени ( $\sigma^3$ ) [61]:

$$A_s = \frac{\mu^3}{\sigma} \rightarrow \mu^3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 * f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

Коэффициентом асимметрии  $A_s$ :

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^3}{n}$$

Стандартное отклонение коэффициента асимметрии  $A_{ssd}$ :

$$A_{ssd} = 3 * \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}$$

Соответственно, в симметричном распределении центральный момент третьего порядка равен нулю ( $\mu^3$  равно 0), то есть алгебраическая сумма отклонений отдельных значений признака (вариант), расположенных слева и справа от средней, равна нулю. График симметричного распределения симметричен относительно точки максимума. Для несимметричных распределений центральные моменты нечетного порядка отличны от нуля, имеет следующую характеристику:  $A_s < 0,25$  – слабая асимметрия;  $A_s = 0,25 - 0,5$  – умеренная асимметрия;  $A_s > 0,5$  – крайне асимметричное распределение.

Коэффициент эксцесса применяется для оценки островершинности «пикообразность» распределения [61].

$$E_x = \frac{m^4}{\sigma_e^4} - 3 \rightarrow m^4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_e)^4 * n_i}{n}$$

Стандартное отклонение коэффициента эксцесса  $E_{xsd}$  :

$$E_{xsd} = 5 * \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}$$

Коэффициент эксцесса при нормальном распределении равен нулю, если распределение имеет отрицательный эксцесс, то у него более пологая вершина по сравнению с «нормальной» кривой. Если у коэффициента эксцесса положительные значения, то более острая вершина распределения по сравнению с нормальной кривой [61, 121].

Иногда как дополнительная характеристика рассчитывается коэффициент вариации. Расчет коэффициента вариации состоит в том, что по множеству значений первым рассчитывается среднее квадратическое отклонение, а потом среднее арифметическое, после, между полученных значение нужно найти их соотношение [122]

Коэффициент вариации рассчитывается по формуле:

$$V = \sigma / \bar{x}$$

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;

$\bar{x}$  – среднее арифметическое значение.

У такого способа расчета квадратического коэффициента вариации есть существенный недостаток. При изменениях во времени стандартное отклонение остается прежним, в другом случае можно рассматривать коэффициент осцилляции по формуле [122]:

$$V = R/\bar{x}$$

$R = X_{max} - X_{min}$ , – размах вариации в виде разности наибольшего и наименьшего значений в совокупности статистических величин.

**Непараметрические критерий согласия.** Непараметрические критерии согласия предназначены для проверки гипотез о принадлежности выбранной выборки. Данный критерий позволяет оценить существенность различий между распределениями двух выборок, в том числе возможно его применение для оценки соответствия распределения исследуемой выборки закону нормального распределения.

**Критерий Смирнова.** Критерий Смирнова предназначается для проверки гипотезы  $H_0$  при конкурирующей гипотезы  $H_1$ . Данный критерий задается по формуле:

$$D_n = \sup |F_n(x) - F(x)|$$

где,  $\sup$  - точная верхняя грань множества;

$F_n$  - функция распределения исследуемой совокупности;

$F(x)$  - функция нормального распределения.

Выводимые значения вероятности основаны на предположении, что среднее и стандартное отклонение нормального распределения известны априори и не оцениваются из данных [124].

В работе критерий Смирнова рассматривался если гипотеза значима ( $p < 0,05$ ), то гипотеза о том, что соответствующее распределение нормально, должна быть отвергнута.

**Критерий t-Стьюдент.** Критерий Стьюдента – статистическая проверка гипотезы, которая основывается на проверке равенства средних значений в двух выборках.

Для сравнения двух средних величин t-критерий Стьюдента рассчитывается по следующей формуле:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}$$

где,  $M_1$  - средняя арифметическая первой сравниваемой совокупности (группы);

$M_2$  - средняя арифметическая второй сравниваемой совокупности (группы);

$m_1$  - средняя ошибка первой средней арифметической;

$m_2$  - средняя ошибка второй средней арифметической.

Так, в работе рассматривалось, что полученные значения t-критерия Стьюдента равно или больше критического ( $p=0,05$ ), найденного по таблице, являлись статистической значимости различий между сравниваемыми величинами. Если значение рассчитанного t-критерия Стьюдента меньше табличного, значит различия сравниваемых величин статистически не значимы [123,124].

Таким образом методика исследования включала в себя различные методы и алгоритмы статистического анализа: определения их максимальных ( $x_{i \max}$ ), минимальных ( $x_{i \min}$ ), средних  $\bar{x}_i$  с ошибкой ( $s$ ) и размаха – ( $\Delta=x_{i \max} - x_{i \min}$ ) величин. Статистическую природу вида распределения значений параметров определяли на основе построения соответствующих гистограмм распределения значений, исходя из равномерной разбивки на разряды, число которых определялось как корень кубический из числа измерений [125], вычисления их коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  с соответствующими ошибками применение критериев согласия Стьюдента и Смирнова (далее по тексту критерии  $C_n$  и  $C_p$ ) с определением уровня риска выдвигаемых гипотез [126,127] и методов когнитивной графики.

## Глава 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1 Предварительная обработка баз данных

Для проведения раскопок баз данных производительного контроля, которые помогут выявить причины неоднородности качества металлопродукции, первоначально нужно провести предварительную обработку базы данных, для дальнейшей работы. Данная обработка подразумевает сортировку, удаление дублирующих значений, структурирование данных. За счет этого выделяются основные направления проведения анализа, понимания что анализировать и зачем. В статье [74] показана важность проведение предварительной обработки баз данных, для объективной оценки качества металлопродукции. При проведении предварительной обработке баз данных, при помощи гистограммам распределения, было выявлено бимодальное распределение значений предела текучести (рисунок 5).

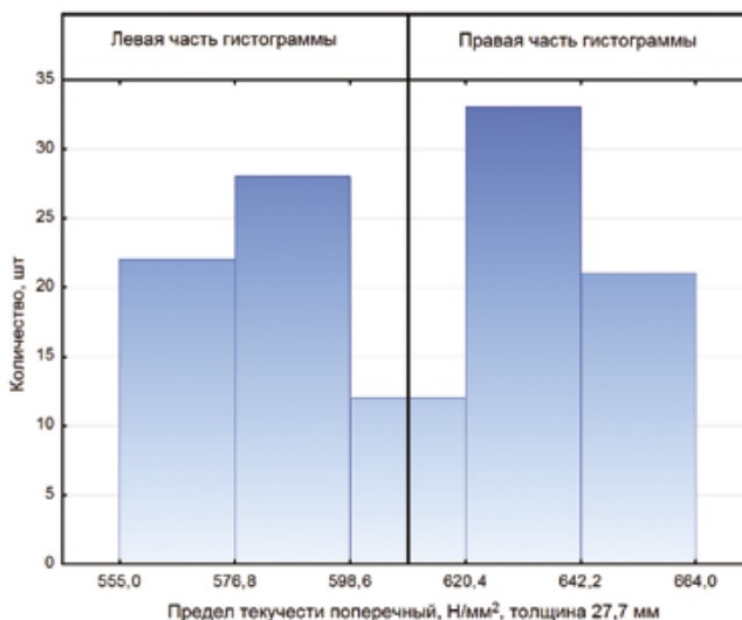


Рисунок 5 - Гистограмма распределения значений условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) трубной стали категории прочности К65 (толщина стенки 27,7 мм) [74].

За счет чего дальнейший анализ среднего значения по объёму выборки не имеет смысла, в связи с большой дисперсией. Коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения составили  $-0,063$  и  $-1,335$  соответственно, что классифицирует его как симметричное, с округлой формой центрального пика. За счет чего было совершенно разделение гистограммы распределения на две части (левая и правая). По полученным данным левой и правой части построили хронологические ряды (как один из приемов когнитивной графики) значений по пределу текучести (рисунок 6).

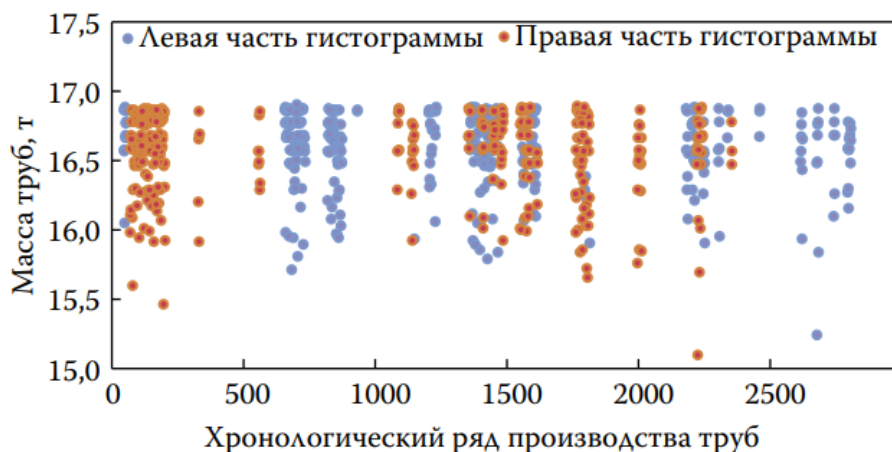


Рисунок 6 - Хронологический ряд значений  $\sigma_{0,2}$ , соответствующих левой и правой частям гистограммы их распределения, полученных при сдаточных испытаниях на растяжение поперечных образцов трубной стали категории прочности К65 различной массы толщиной стенки 27,7 мм [74].

Построение хронологических рядов позволило выявить чередующийся характер данных, колебания которых обусловлены особенностями технологического процесса. Очевидно, что при сопоставлении данных результатов с изменениями соответствующих технологических параметров возможно выявление структурных факторов, определяющих формирование неоднородности качества металла. В целом это будет способствовать созданию сквозной системы управления качеством металла [74].

В исследуемых объектах также проводилась предварительная обработка данных, где при обработке данных крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, были обнаружены выбросы по приемо-сдаточным параметрам (рисунок 7-8).

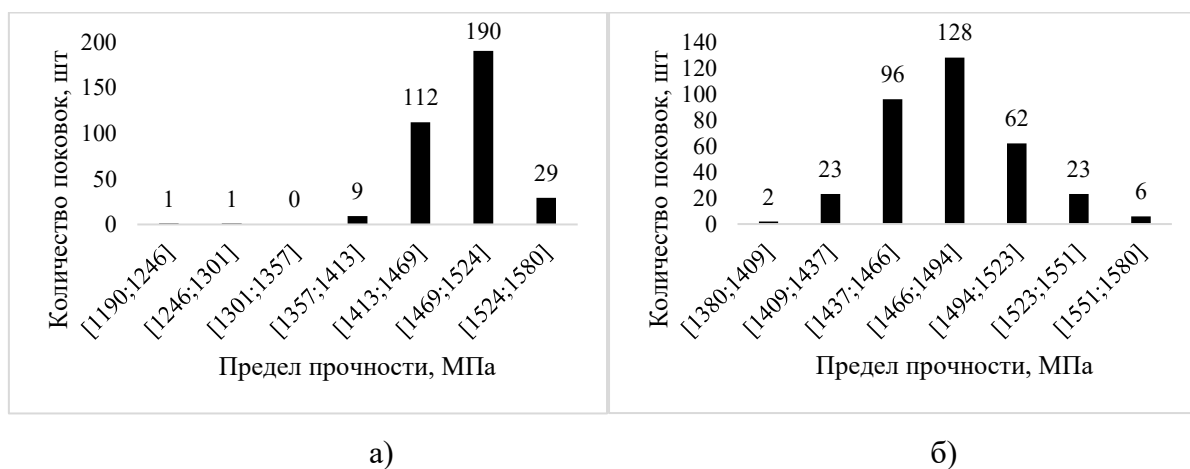
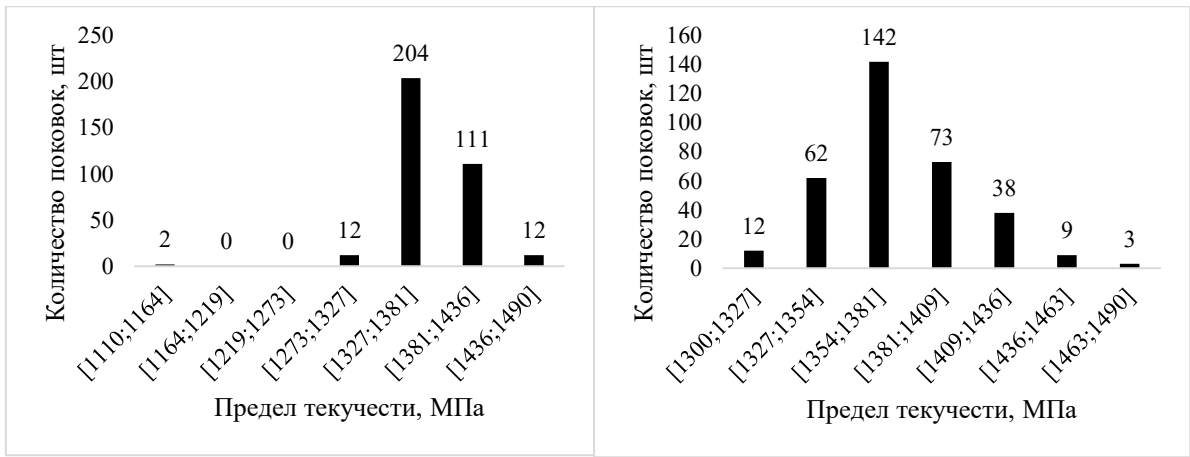


Рисунок 7 - Распределения значений первого испытания предела прочности с выбросами (а), без выбросов (б), крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, для торцевых темплетов диаметром  $D_s$



а)

б)

Рисунок 8 - Распределения значений первого испытания предела текучести с выбросами (а), без выбросов (б), крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, для торцевых темплетов диаметром  $D_s$

При дальнейшем анализе совместного влияние одного параметра на другой параметр (прочности, текучести, удлинения), учитываться поковки не будут. Но будут использоваться поковки с выбросами при дальнейших расчетах классической статистики, так как они будут использоваться при анализе других приемо-сдаточных параметров.

Также при построение временных и хронологических рядов первого  $\{КСУ_i^{-40}\}$ , второго  $\{КСУ_j^{-40}\}$  и третьего  $\{КСУ_k^{-40}\}$  испытаний – сталь 13Г1С-У, где номер испытания соответствовал определенному номеру столбца в матрице данных, выявили закономерности влияния управляющих и приемо-сдаточных параметров (рисунок 9-10) [128].

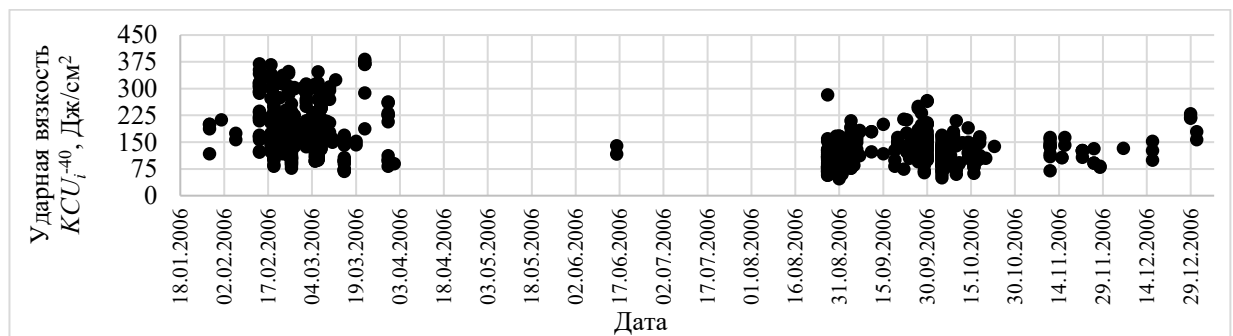
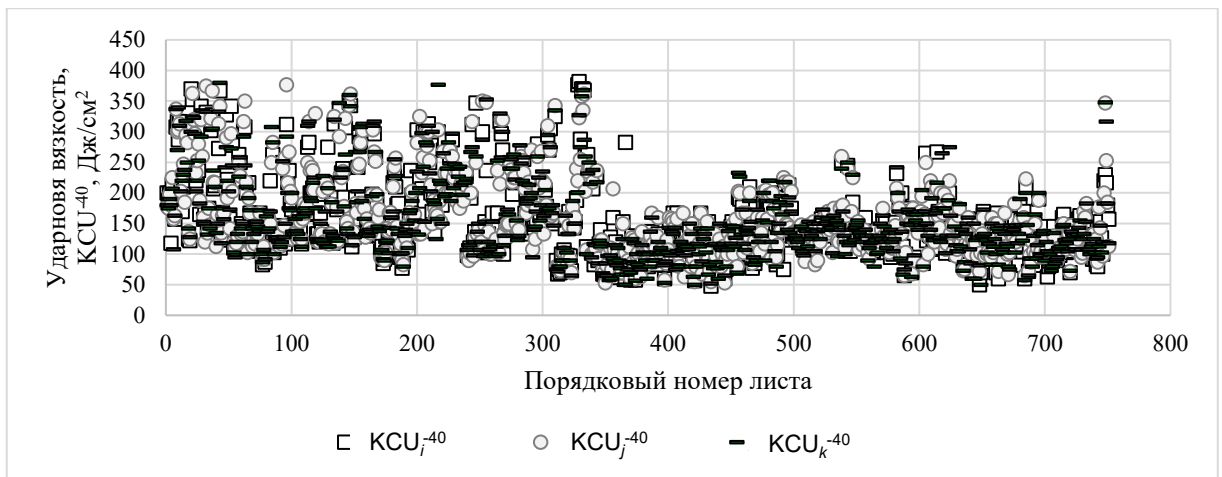
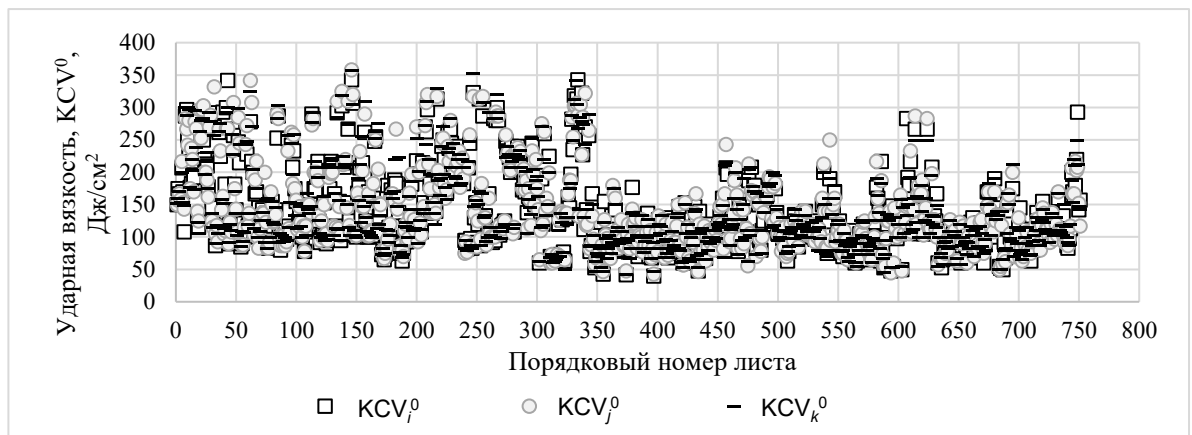


Рисунок 9 - Временной ряд ударной вязкости  $КСУ_i^{-40}$ , Дж/см<sup>2</sup> листа толщиной 8 мм из листовой стали 13Г1С-У.





а)



б)



в)

Рисунок 10 - Хронологические ряды распределения ударной вязкости  $KCU_{-40}$  (а), ударная вязкости  $KCV^0$  (б) и сопутствующего содержания ниобия (в) в листе (толщиной 8мм) из стали 13Г1С-У [128]

В результате предварительной обработки листов стали 13Г1С-У, на механические свойства выявлено разделение на два подмассива: с низким ( $Nb \leq 0,03$  %, масс) и высоким ( $Nb > 0,03$  %, масс) содержанием ниобия, количество партий в которых для толщин 8,10 и 12 мм составило: 269, 395, 260 и 489, 273, 1021 штук соответственно. Их совместный статистический анализ привел бы к усреднению как выходных, так и входных значений

параметров. Это исказило бы действительный вид гистограмм распределения значений параметров и осложнило применение статистических инструментов, в частности регрессии. В этой связи последующий статистический анализ проводился отдельно для двух подмассивов данных [128].

### **3.2 Особенности оценки масштаба неоднородности качества металлопродукции**

Производство стали – сложный и многоступенчатый процесс, каждый этап которого хорошо оснащен средствами измерения и сбора информации. Уровень качества металлопродукции, в зависимости от её назначения, обычно контролируется на основе определения её механических свойств, оценки структуры и изломов. Объективность их оценки важна также для решения обратной задачи: определения связи свойств со структурой, выделения критических параметров структуры, определяющих разброс качества металла, и выработки на этой основе технологических рекомендаций, направленных на повышение его однородности [1,129]. В этой связи, в частности, большие ожидания от результатов применения современных IT: нейросети, алгоритмы Big Data, машинного обучения и т.п., для обработки больших массивов данных производственного контроля процесса и продукта [6,130-132]. В результате проявляется повышенный интерес к развитию методов оценки качества металлопродукции, особенно в связи с теми возможностями, которые появляются при цифровизации измерений структур и изломов, проведении и обработке результатов экспериментов в принципе [7-8].

Существующая практика подходов к анализу данных производственного контроля при производстве металлопродукции достаточно широка и разнообразна [118]. Однако если не рассматривать вопросы, связанные с оперативным мониторингом контролируемых параметров для каждого вида продукции во всех ключевых контрольных точках, непрерывный контроль и выявление отклонений в ходе технологического процесса на основе статистических методов, преимущественно решаются вопросы управления технологическим процессом на уровне агрегата [118].

В металлообработке для повышения точности прогноза, нашли применение новейшие самообучающиеся системы (алгоритмы), созданные на основе которых прогностические модели тестируют на основе архивных данных, а последующую их корректировку с целью дальнейшего повышения точности прогноза проводят на основе текущих практических результатов [102]. Для задач прогноза используют различные физические модели [118].

В данной разделе показано применение методов классической статистики при проведении раскопок баз данных, где первоначальным этапом является оценка масштаба неоднородности качества металлопродукции. Для этого были определены основные статистические характеристики приемо-сдаточных параметров исследуемых материалов (таблица 2).

Таблица 2 - Масштаб неоднородности приемо-сдаточных параметров исследуемой металлопродукции [118,128].

Сталь	Тип изделия	Параметры качества ( $x_{i \max} - x_{i \min}$ ) = $\Delta$							
		$\bar{x}_i \pm s$							
		KCV <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>0</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-50</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-60</sup> , Дж / см <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
38ХНЗМФА-Ш	поковка	<u>63–28</u>	-	-	<u>58–20</u>	-	<u>1570–1340</u>	<u>1570–1340</u>	<u>17,5–8,8</u>
		47,4 ±4,4			40,1 ±4,4		1478 ±24,7	1478 ±24,7	14 ±0,9
40ХМФА	сорт	<u>175–60</u>	-	-	-	-	<u>1400–1030</u>	<u>1400–1030</u>	<u>20–7</u>
		100±19					1173,5±69,8	1173,5±69,8	14,1±1,06
09Г2С	лист	<u>438–80</u>	-	-	-	<u>430 – 78</u>	<u>590–465</u>	<u>590–465</u>	<u>38–28</u>
		241,4 ±59,1				215,5±66,2	503,9 ±11,2	503,9 ±11,2	30,5±1,5
13Г1С-У (Nb≤0,03)	лист	-	<u>475–60</u>	<u>491–46</u>	-	-	<u>630–461</u>	<u>575–342</u>	37–18
			174±64	189±62			529±22	435±30	29±3
13Г1С-У (Nb>0,03)	лист	-	<u>372–26</u>	<u>489–14</u>	-	-	<u>660–487</u>	<u>560–379</u>	36–17
			118±50	133±49			569±27	455±27	28±3
15ХСНД	лист	<u>323–61</u>	-	-	-	<u>365–68</u>	<u>620–505</u>	<u>620–505</u>	<u>34–21</u>
		168,8 ±27,9				160,1 ±27,1	565,1±13,4	565,1±13,4	27,1±1,4

В таблице 2 наблюдался большой разброс механических свойств металла, а именно в листовой стали 13Г1С-У, 15ХСНД, 09Г2С максимальное значение вязкости превышало минимальное в 5–6 раз, а для крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш и сортового проката стали 40ХМФА – в 2 раза. Статистическая природа таких значений должна найти свое отражение во временных и хронологических рядах, которые помогают оценить сезонные колебания и выявить периодичность однотипной продукции (рисунок 11–12).

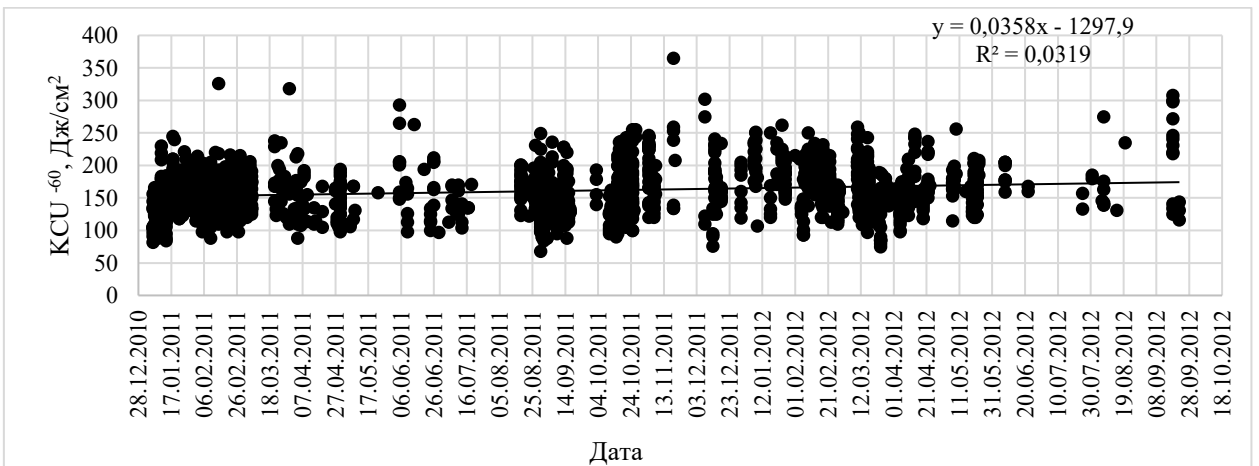


а)

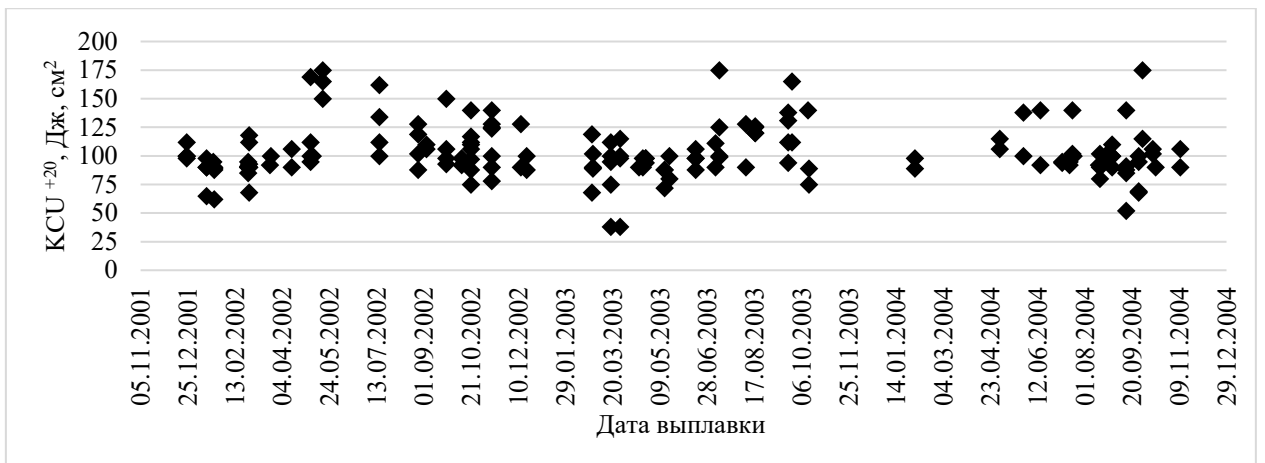


б)

Рисунок 11 – Хронологическое распределения ударной вязкости (КСУ) сталей 15ХН8Д (а) и стали 40ХМФА (б)



а)



б)

Рисунок 12 – Временное распределения ударной вязкости (KCU), сталей 15ХНсД (а) и стали 40ХМФА (б)

При анализе временных и хронологических рядов наблюдался большой размах, в виде выбросов. Выбросы данных (большой размаха) наблюдались как в начале, так и в конце выборки. Отсюда был проведен анализ влияние объёма и влияние выбросов в данных, которые могут в существенной мере повлиять на выявления закономерностей причин неоднородности. Так основным статистическим методом для оценки объёма выбросов, является анализ размаха, который может провести оценку разброса, и распределения данных. Проводился анализ размаха по управляющим и приемо-сдаточным параметрам металла, результаты должны найти свое отражение в статистической природе значений показателей качества (рисунок 13–16).



Рисунок 13 - Закономерности изменения размахов значений параметров процесса насыщения значений содержание углерода сталь 15СХНД

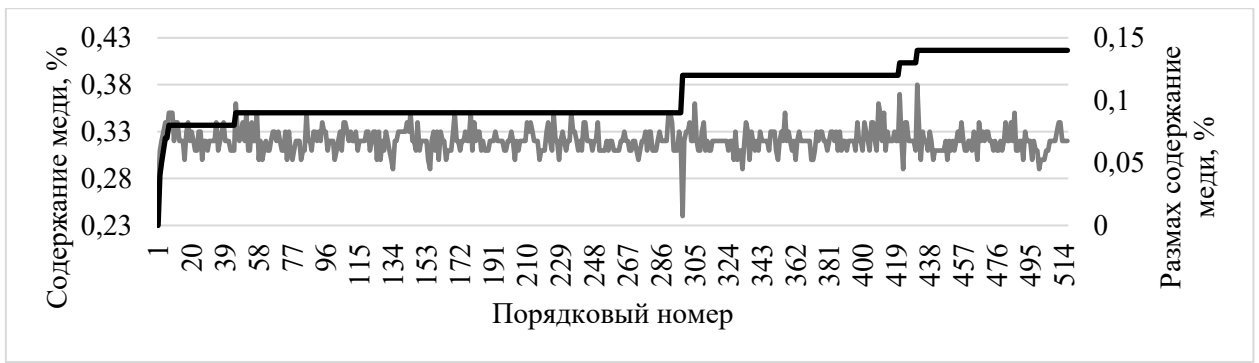


Рисунок 14 - Закономерности изменения размахов значений параметров процесса насыщения значений содержание меди сталь 15СХНД



Рисунок 15 - Закономерности изменения размахов значений параметров процесса насыщения первого испытания предела прочности  $\sigma_B$ , МПа, поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш для торцевого темплета диаметром  $D_s$



Рисунок 16 - Закономерности изменения размахов значений параметров процесса насыщения значения ударной вязкости КСУ<sup>+20</sup>, стали 40ХМФА

Анализ значений насыщение размаха по управляющим и приемо-сдаточным параметрам листовых сталей 15СХНД, 13Г1С-У, 09Г2С, сортовой стали 40ХМФА и крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, показал, последовательное накопление размаха по мере увеличения объема выборки, либо достигнуть своих максимальных значений при малой выборке, и долгое время может оставаться неизменным. Большой размах может быть связан с наличием единичных выбросов, а средние значения и их дисперсии характеризуют

неоднородность значений параметров всей выборки в целом (наиболее полно при нормальном характере распределения значений параметров). Отклонение от нормального вида распределения значений управляющих было «предусмотрено» наличием поля допуска технологии, для приемо-сдаточных параметров вопрос оставался открытым [118,128]. Этим определялся интерес к построению их гистограмм распределения по всем объектам исследования (рисунок 17-18).

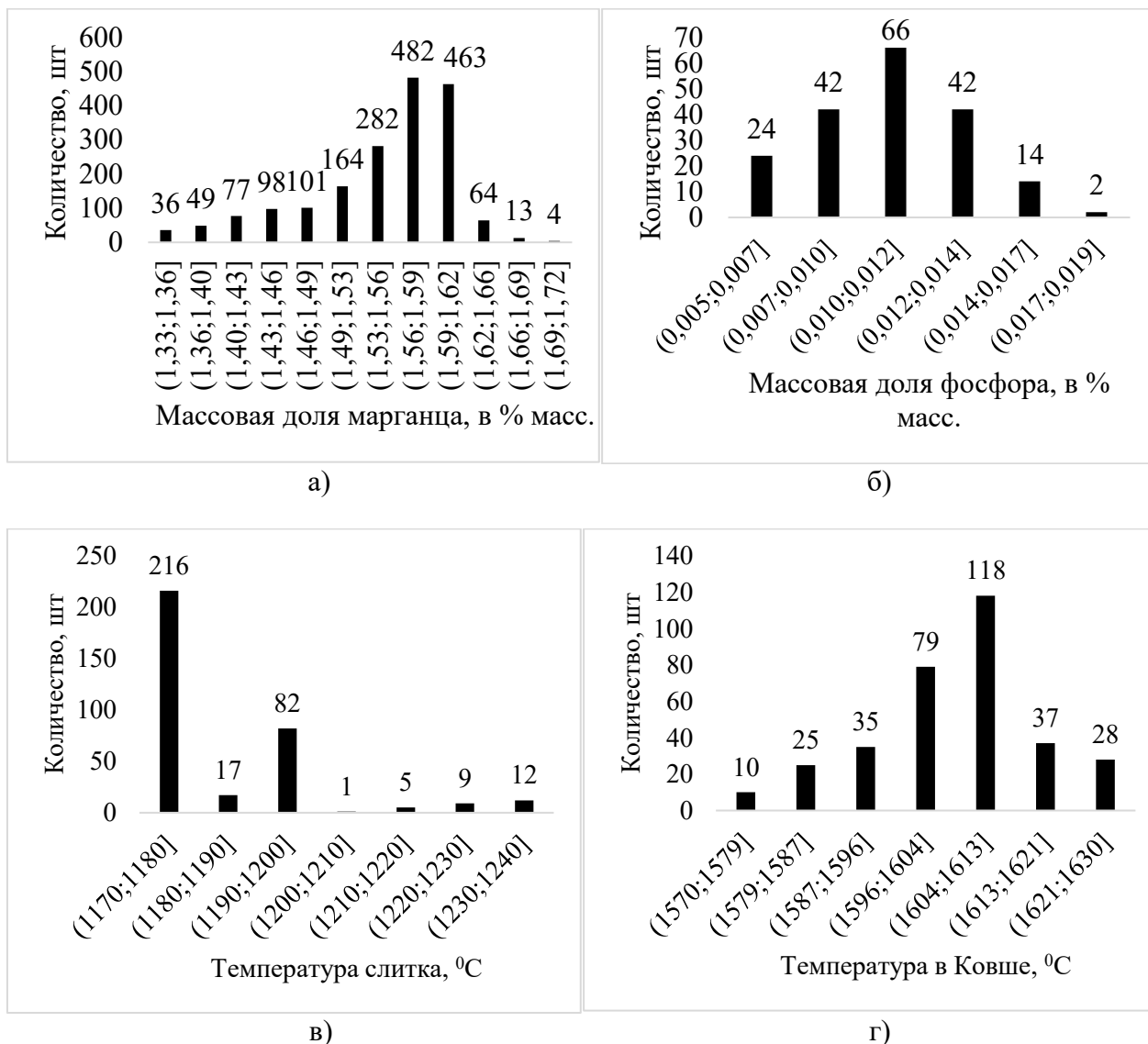


Рисунок 17 - Распределение значений управляющих параметров стали: массовая доля марганца стали 09Г2С (а); массовая доля фосфора стали 40ХМФА (б); температура слитка (в) и температура в Ковше (г) в стали 38ХНЗМФА-Ш.

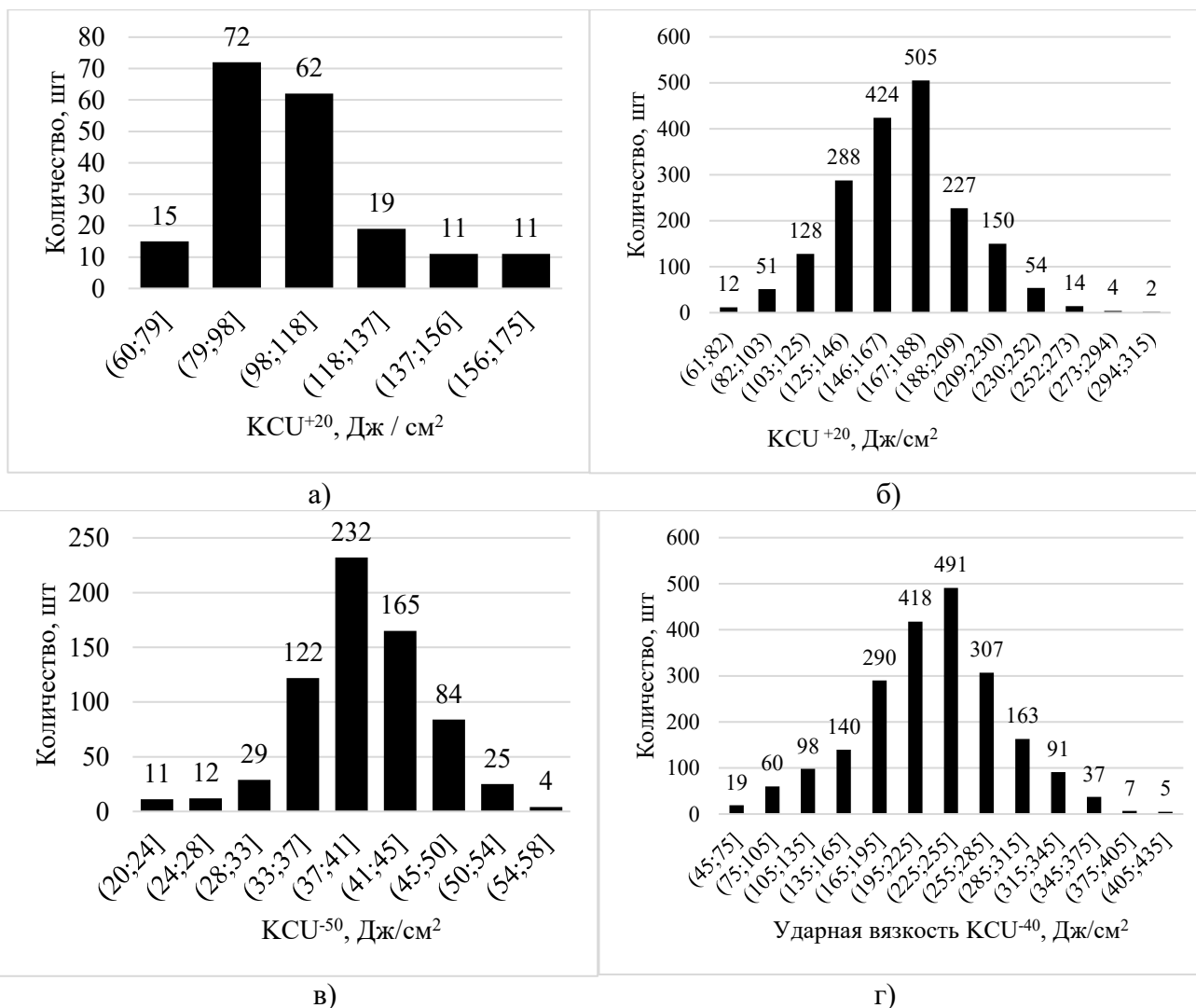


Рисунок 18 – Распределения значений ударной вязкости (KCU) сталей 40ХМФА (а); 15ХСНД (б); 38ХНЗМФА-Ш (торцевой темплет диаметра  $D_s$ ) (в) и 09Г2С (г)

При построении гистограмм распределения наблюдалось отклонение от нормального вида распределения. Для оценки масштаба отклонения дополнительно оценивали распределение по коэффициентам асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ . Полученные результаты по управляющим и приемо-сдаточным параметрам варьировались в пределах от -5,58 до 4,96 и от -2,00 до 11,95. Принято считать, что асимметрия в ряду распределения считается значительной, если коэффициент асимметрии по модулю больше 0,5, если в пределах 0,25–0,5 это умеренная асимметрия, менее 0,25 это слабо значимая асимметрия. Насыщение значимости коэффициента асимметрии и эксцесса может произойти в начале объёма, так и в конце исследуемой выборки баз данных. Отсюда возникает вопрос, о необходимости какого объёма данных для объективной оценки вида распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса. Так был проведен анализ предварительной релевантности баз данных на основе коэффициентов асимметрии и эксцесса, где в качестве



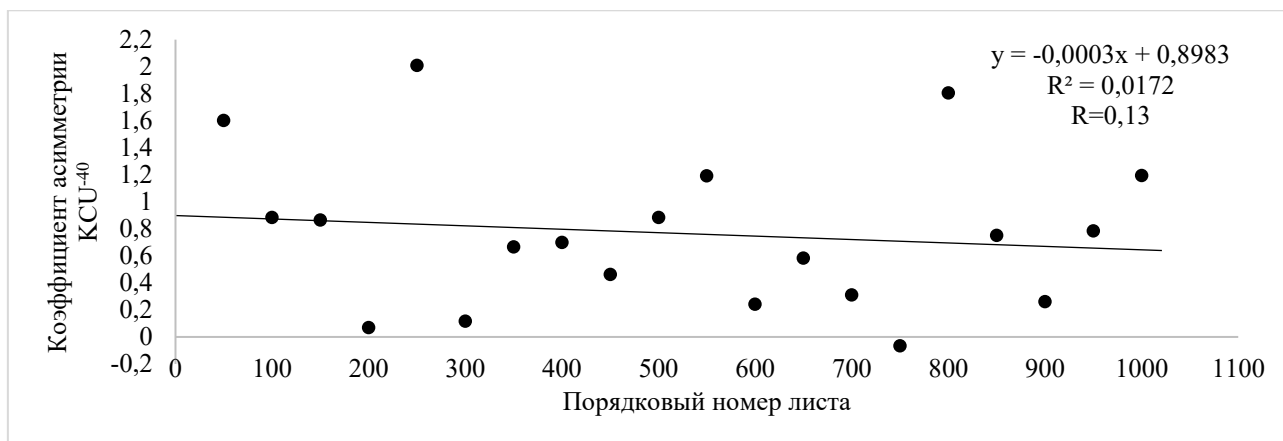
объекта выступала ударная вязкость (КСУ) листовой стали 13Г1С-У, в связи с наличием больших размахов.

При анализе коэффициентов в листовой стали 13Г1С-У наблюдалась значимая асимметрия (более 0,5), так как имела отклонение от нормального распределения. Коэффициенты на прочность показал обратное (менее 0,25). Можно сказать, что на пластичность в меньшей мере сказываются факторы металлургического качества, и различные комбинации значений управляющих параметров состава и технологии соответственно. Из-за чего, был проведен анализ влияния количества образцов при одной и той же технологическом процессе на коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ , как по отдельным фрагментам выборок ограниченного объема (по 50 партиям), так с последовательным накоплением объёма выборки с шагом 50 партий (таблице 3).

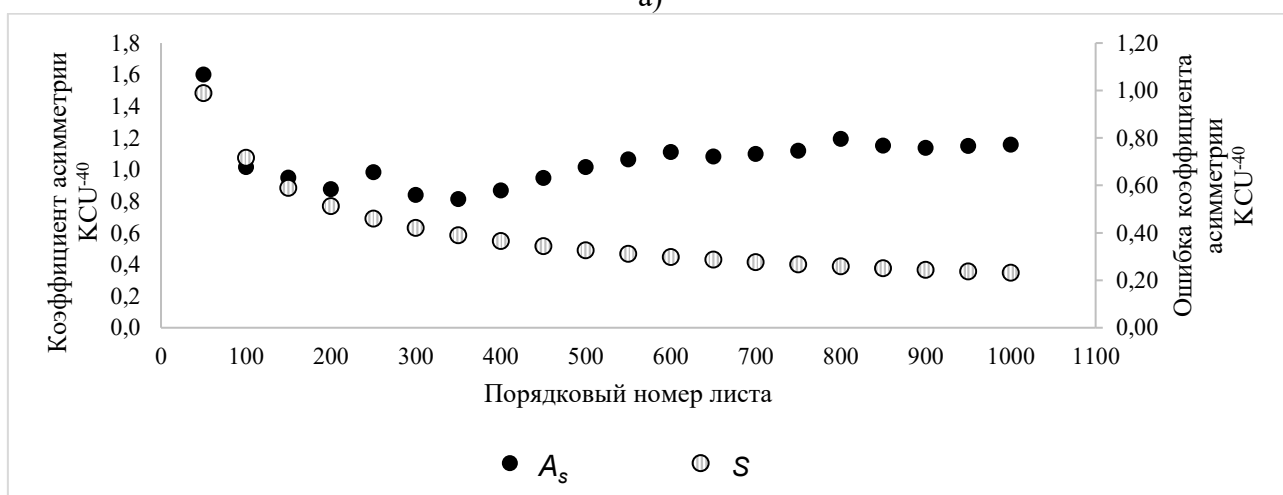
Таблица 3 - Величины коэффициентов асимметрии  $A_s$  распределения значений механических испытаний в исследуемых сталях

Объём выборки	$S$	13Г1С-У		09Г2С		15ХСНД		38ХНЗМФА-Ш			
		КСУ <sup>-40</sup> (12 мм. Nb>0,03)		КСУ <sup>-40</sup>		КСУ <sup>-60</sup>		КСУ <sup>-50</sup> $D_l$		КСУ <sup>-50</sup> $D_s$	
		Каждые 50	Накопление	Каждые 50	Накопление	Каждые 50	Накопление	Каждые 50	Накопление	Каждые 50	Накопление
50	0,989	1,601	1,601	-0,394	-0,394	0,052	0,052	0,180	0,180	0,055	0,055
100	0,717	0,884	1,016	0,331	-0,100	2,569	1,706	-0,497	-0,808	0,320	0,173
150	0,590	0,864	0,949	0,203	0,173	-0,202	1,185	0,014	-0,676	0,807	0,384
200	0,513	0,067	0,877	-1,470	0,165	0,927	1,046	0,226	-0,513	0,331	0,357
250	0,460	2,009	0,985	0,077	0,248	0,293	0,874	-0,521	-0,513	0,124	0,306
300	0,421	0,116	0,840	0,672	0,299	-0,646	0,580	0,485	-0,424	0,241	0,297
350	0,390	0,666	0,814	0,527	0,297	-0,333	0,570	0,177	-0,342	0,320	0,226
400	0,365	0,698	0,868	0,300	0,294	0,778	0,587				
450	0,344	0,462	0,948	0,148	0,279	2,571	0,608				
500	0,327	0,883	1,016	-0,912	0,187	1,264	0,627				
550	0,312	1,191	1,065	0,310	0,206	0,732	0,618				
600	0,299	0,241	1,112	0,391	0,232	0,188	0,577				
650	0,287	0,583	1,083	-0,521	0,228	0,689	0,585				
700	0,277	0,309	1,099	-0,260	0,262	-0,223	0,524				
750	0,267	-0,066	1,119	0,515	0,251	-1,202	0,425				
800	0,259	1,806	1,193	1,193	0,294	-0,215	0,385				
850	0,251	0,750	1,151	0,377	0,308	1,755	0,588				
900	0,244	0,261	1,139	-0,113	0,277	0,194	0,558				
950	0,238	0,785	1,151	-0,821	0,213	1,257	0,648				
1000	0,232	1,195	1,157	0,067	0,220	0,102	0,615				
1050	0,226			-1,745	0,213	0,900	0,587				
1100	0,221			-0,593	0,227	0,613	0,569				
1150	0,216			-0,321	0,226	0,622	0,568				
1200	0,212			0,176	0,227	0,205	0,560				
1250	0,207			1,245	0,251	-0,079	0,533				
1300	0,203			0,848	0,271	0,243	0,577				
1350	0,200			0,791	0,282	0,784	0,797				
1400	0,196			0,223	0,280	-0,299	0,752				
1450	0,193					0,002	0,725				
1500	0,189					-0,594	0,675				
1550	0,186					0,082	0,637				
1600	0,183					0,630	0,638				
1650	0,181					0,203	0,622				
1700	0,178					0,317	0,616				
1750	0,175					0,613	0,620				
1800	0,173					0,842	0,626				
1850	0,171					0,700	0,614				
1900	0,168					0,293	0,609				

Для полного понимания распределения было построены хронологические ряды коэффициентов асимметрии  $A_s$  (рисунок 19).



а)



б)

а) – коэффициент асимметрии по отдельным фрагментам выборок ограниченного объема (по 50 партиям); б) – коэффициент асимметрии с ошибкой коэффициента асимметрии с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий  
Рисунок 19 - Распределения коэффициента асимметрии ударной вязкости  $K_{CU-40}$ , сталь 13Г1С-У, лист толщиной 12 мм, Nb>0,03%, масс.

По трем образцам ударной вязкости  $K_{CU-40}$ , коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ , отдельных фрагментов выборок ограниченного объема (по 50 партиям) имели хаотичное распределение. Разброс по листу 12 мм. с Nb> 0,03%, масс., варьируется от -0,28 до 2,98, и от -1,21 до 15,62, а с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий (всего 1000 партий) варьируется от 0,47 до 1,82, и от 0,15 до 5,93.



а)



б)

а) – коэффициент асимметрии по отдельным фрагментам выборок ограниченного объема (по 50 партиям); б) – коэффициент асимметрии с ошибкой коэффициента асимметрии с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий  
Рисунок 20 - Распределения коэффициента асимметрии ударной вязкости  $KCU^{-60}$ , сталь 15ХСНД

В стали 15ХСНД, наблюдался ступенчатый размах коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий. Это связано с большим разбросом ударной вязкости, что подтверждается при построении хронологических рядов ударной вязкости стали 15ХСНД (рисунок 21).

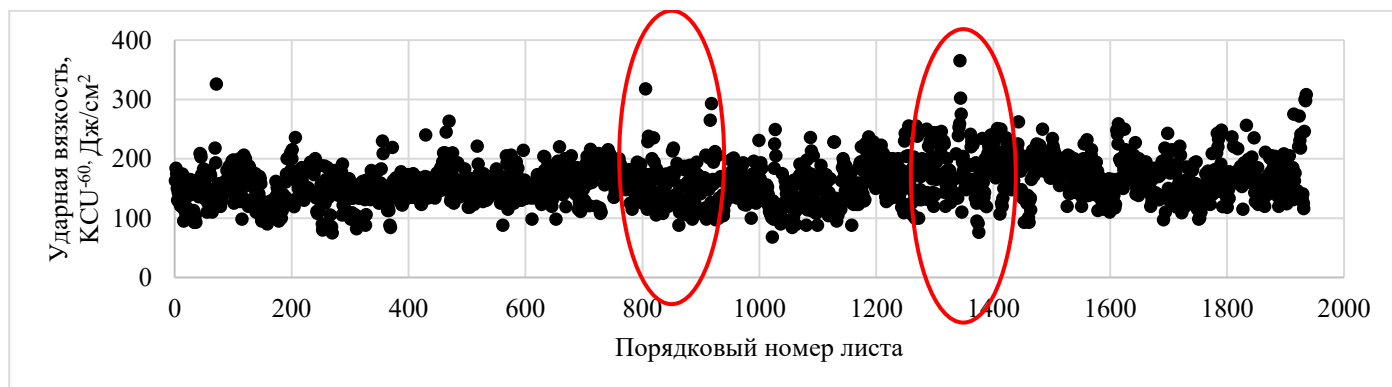
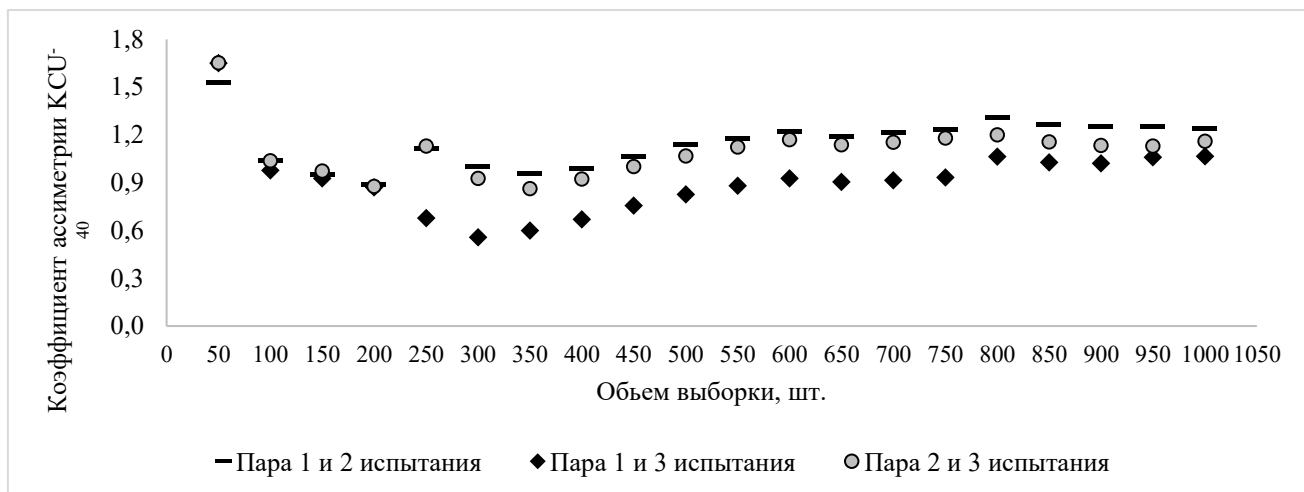
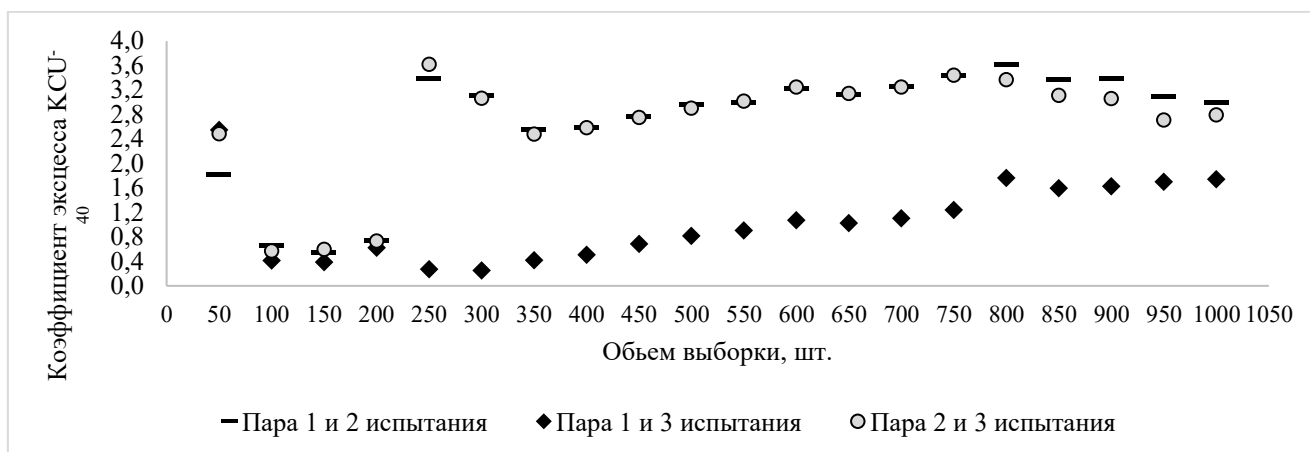


Рисунок 21 - Хронологический ряд ударной вязкости  $KCU^{-60}$ , Дж/см<sup>2</sup>, сталь 15ХСНД

В листовой стал 13Г1С-У, по полученным результатам коэффициентах асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ , наблюдался малый размах между значений ударной вязкости с V – образным надрезом при нулевой температуре испытания, так как они имеют более однородную выборку, из-за схожести образцов между собой. Так был проведен анализ по вариациям различных групп образцов (1-2, 1-3, 2-3), по коэффициентам асимметрии и эксцесса с учетом влияния количества образцов при одной и том же технологическом процессе на коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий (рисунок 22).



а)



б)

Рисунок 22 - Распределения масштаба неоднородности ударной вязкости  $KCU^{-40}$  по асимметрии  $A_s$  (а) и эксцесса  $E_x$  (б) с последовательным накоплением объема выборки с шагом 50 партий, сталь 13Г1С-У, лист толщиной 12 мм, Nb > 0,03%, масс.

Дополнительно проведен сравнительный анализ по трем образца по асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ , по  $KCU^{-40}$  и  $KCV^{+0}$  (рисунок 23).

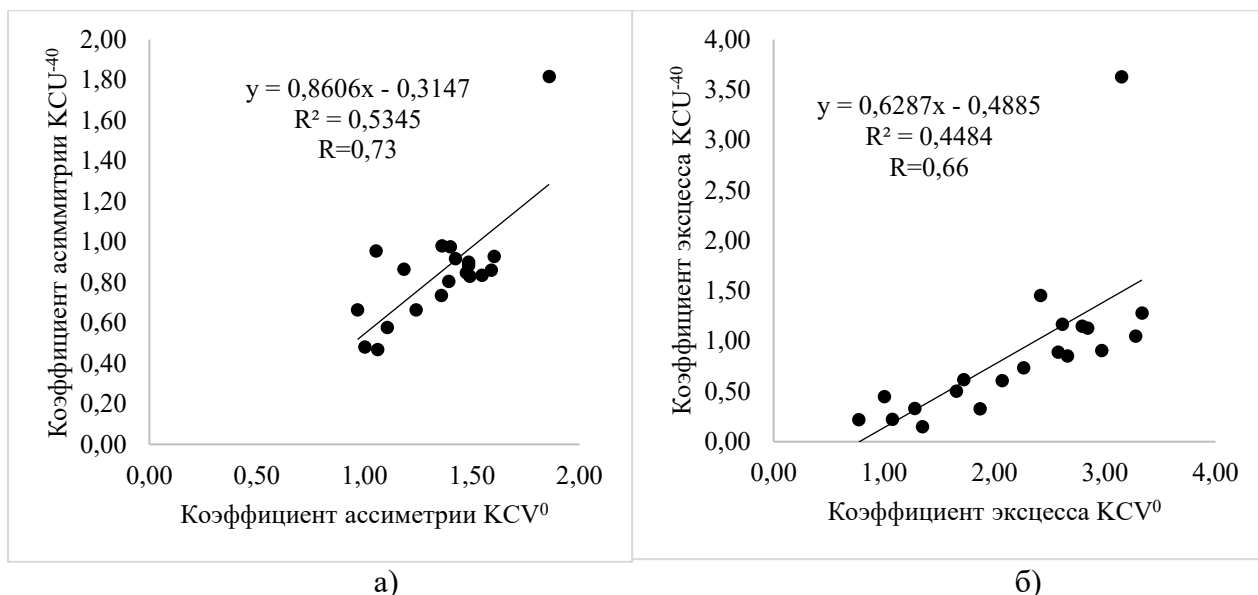
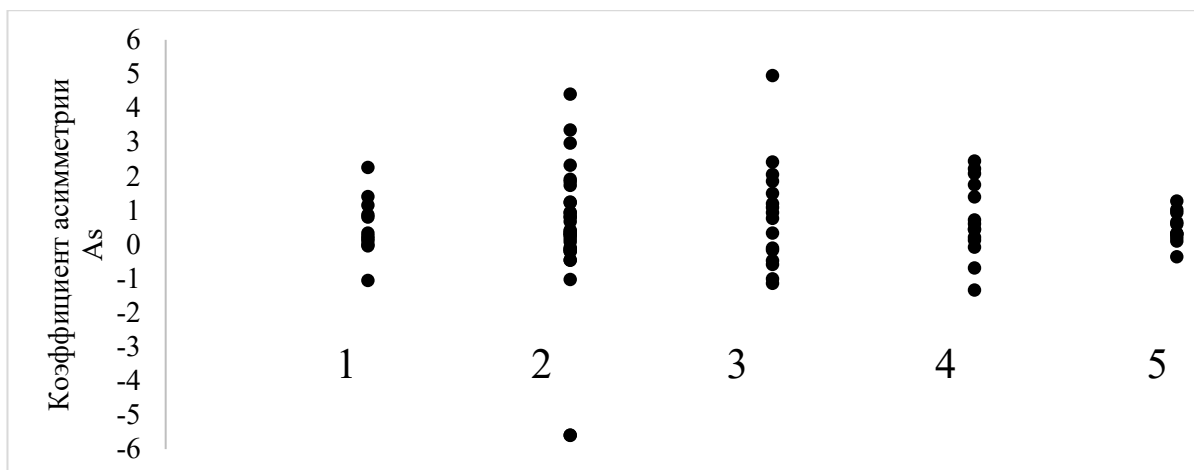


Рисунок 23 - Соотношение коэффициентов асимметрии  $A_s$  (а) и эксцесса  $E_x$  (б) по ударной вязкости  $KCV^0$  и  $KCU^{-40}$ , с последовательным накоплением объёма выборки с шагом 50 партий, сталь 13Г1С-У, лист толщиной 12 мм, Nb > 0,03% масс.

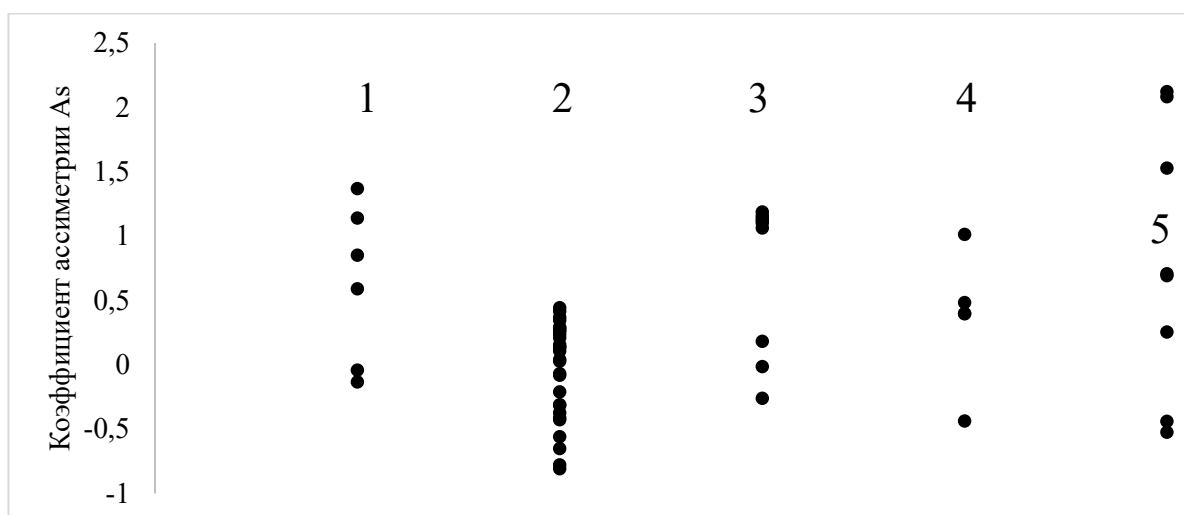
Сравнительный анализ показал, при пониженной температуре испытаний  $KCU^{-40}$ , появляться выброс для отдельных образцов ударной вязкостью, связанный с близостью температурного интервала вязко-хрупкого перехода. Для ударной вязкости с U – образным надрезом, добавление третьего образца, несет в себе абсолютно случайный характер в распределении, и может вносить корректировку как по асимметрии, так и по эксцессу.

В целом полученные результаты указывают на значительный разброс качества металлопродукции, что определяет интерес к выявлению причин этого с использованием ретроспективного анализа баз данных заводского контроля. Выявлено также существенное различие статистической природы выборок результатов измерения качества продукта и процесса (рисунок 24-25), что также необходимо учитывать при дальнейшем статистическом анализе массивов данных производственного контроля.



1) 09Г2С; 2) 38ХНЗМФА-Ш; 3) 13Г1С-У; 4) 40ХМФА; 5) 15ХСНД

Рисунок 24 - Масштаб неоднородности видов распределения значений управляющих параметров в сталях, оцениваемый по величинам их коэффициентов асимметрии



1) 09Г2С; 2) 38ХНЗМФА-Ш; 3) 13Г1С-У; 4) 40ХМФА; 5) 15ХСНД

Рисунок 25 - Масштаб неоднородности видов распределения значений прямо-сдаточных параметров в сталях, оцениваемый по величинам их коэффициентов асимметрии

Полученные результаты показали, что различные испытания при сравнении между собой по коэффициентам асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  по выборки могут различаться. Это означает что при различных объёмах выборки ниже достаточного, придётся работать с выборками имеющие различную статистическую природу. Также коэффициентов асимметрии и эксцесса недостаточно для описания объёма и вида распределения для грубой оценки. Как говорилось ранее для значимой оценки симметричности, предпочтительнее использовать для сравнения все-таки непараметрическую статистику, который более спокоен к распределению. А точнее проводить оценку симметричности по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ).

### 3.3 Влияние количества образцов на статистику распределения значений параметров качества металлопродукции

Существующие на сегодняшний день стандарты проведения механических испытаний регламентируют форму, размеры и место вырезки образцов. Что касается выбора количества образцов, то в некоторых случаях указываются минимальные требования (ГОСТ 1497-2023 пункт 4.2.1 - 2 образца) а в других (ГОСТ 9454-78) и вовсе отсутствует данная информация. Именно поэтому производитель старается придерживаться минимального количества испытаний, регламентированных ГОСТ, если иное не предусмотрено в нормативно-технической документации на металлопродукцию, т.к. большое количество выпускаемой металлопродукции в крупнотоннажном производстве неизбежно сказывается на увеличении количества испытаний и как следствие больших затратах. Такая экономия приводит к возникновению рисков получения необъективных и недостоверных результатов, связанных в первую очередь со сложной технологической цепочкой производства, стали и, как следствие, возникающим разбросом механических свойств даже в пределах одного изделия. Данное обстоятельство необходимо учитывать при сертификации металлопродукции ответственного назначения и при изменении правил и норм выборок, регламентированных устаревшими стандартами.

В связи с этим целью исследования является оценка рисков при проведении статистического анализа баз данных производственного контроля, связанных с потерей информации при различных вариациях количества образцов, на основе которой может приводиться рекомендаций для приемно-сдаточных испытаний конструкционных сталей.

В качестве объекта выступила тангенциальные образцы для механических испытаний из поволоки стали 38ХНЗМФА-Ш, которые вырезались из торцевых темплетов с максимальным  $D_l$  и минимальным  $D_s$  диаметром, по два образца на каждую температуру испытания: на растяжение (при  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и удар: при  $+20$  ( $KCU_i$  и  $KCU_j$ ) и  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $KCU_i^{-50}$  и  $KCU_j^{-50}$ ). И листовая сталь 13Г1С-У, где от каждой партии отбиралось по одному поперечному образцу на растяжение (при комнатной температуре) и по три поперечных ударных образца ( $KCU_i^{-40}$ ,  $KCU_j^{-40}$ ,  $KCU_k^{-40}$  и  $KCV_i^0$ ,  $KCV_j^0$  и  $KCV_k^0$ ) для испытаний при температурах  $-40$  и  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно [128].

Был оценен масштаб неоднородности качества по каждой толщине листовой стали 13Г1С-У (таблица 4).



Таблица 4 - Масштаб неоднородности качества листовой стали 13Г1С-У [128].

№, % масс	Толщина листа, мм	Параметры	KCU <sup>-40</sup> , Дж / см <sup>2</sup>	KCV <sup>0</sup> , Дж / см <sup>2</sup>	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %
≤0,03	8	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	380-77=303	358-60=298	610-461=149	575-342=233	36-20=16
		$\bar{x}_i \pm s$	192±68	168±64	536±26	454±34	29±3
	10	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	491-60=431	475-62=413	575-342=233	625-479=146	34-18=16
		$\bar{x}_i \pm s$	189±63	178±68	454±34	526±21	29±3
	12	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	378-46=332	363-75=288	630-465=165	630-465=203	37-19=18
		$\bar{x}_i \pm s$	183±52	171±55	526±19	429±22	29±3
>0,03	8	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	382-48=334	343-40=303	660-487=173	545-391=154	36-18=18
		$\bar{x}_i \pm s$	135±51	121±52	568±29	450±25	28±3
	10	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	280-48=232	372-52=320	560-399=161	655-515=140	36-19=17
		$\bar{x}_i \pm s$	136±40	118±47	464±26	577±24	27±3
	12	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	489-14=475	365-26=339	640-492=148	545-379=166	36-17=19
		$\bar{x}_i \pm s$	132±50	117±50	568±20	455±27	28±2

Таблица 5 - Масштаб неоднородности качества поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш по испытаниям образцов, вырезанных из торцевых темплетов поковок диаметром  $D_i$  и  $D_s$  [128].

	Показатели	KCU <sup>+20</sup> , Дж / см <sup>2</sup>	KCU <sup>-50</sup> , Дж / см <sup>2</sup>	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %
$D_s$	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	63-28=35	58-20=38	1580-1190=390	1490-1110=380	16,5-9,3=7,2
	$\bar{x}_i \pm s$	47±6	40±6	1278±40	1375±35	13,6±1,1
$D_i$	$x_{i \max} - x_{i \min} = \Delta$	56-31=25	51-20=31	1570-1340=230	1490-1230=260	17,5-8,8=8,7
	$\bar{x}_i \pm s$	43±4	33±5	1483±31	1377±23	12,3±1,1

Полученные результаты по оценке масштаба неоднородности показали большой размах ударной вязкости (KCU). Такая неоднородность вязкости обусловлена различиями в сценариях протекания технологической наследственности – реализацией разнообразных механизмов эволюции структур и дефектов по технологической цепочке и, как следствие, многообразии морфологии номинально однотипных конечных структур [1,133,134]. Это предполагает необходимость объективной оценки масштабов разброса ударной вязкости, в связи с чем, возможное различие в количестве испытываемых образцов, в данном случае применимо к отдельной поковке или партии листов, может оказаться существенным фактором, определяющим корректность оценки [128].

Такой разброс качества металла должен найти свое отражение в статистической природе (случайное симметричное распределение) значений показателей качества. Для этого была проведена оценка распределения значений по одному испытанию ударной вязкости, которую строили по отдельности. Так для результатов первого {KCU<sub>i</sub><sup>-40</sup>}, второго

{ $KCU_j^{-40}$ } и третьего { $KCU_k^{40}$ } испытаний – сталь 13Г1С-У и первого { $KCU_i^{-50}$ } и второго { $KCU_j^{-50}$ } испытаний – сталь 38ХНЗМФА-Ш, где номер испытания соответствовал определенному номеру столбца в матрице данных [128].

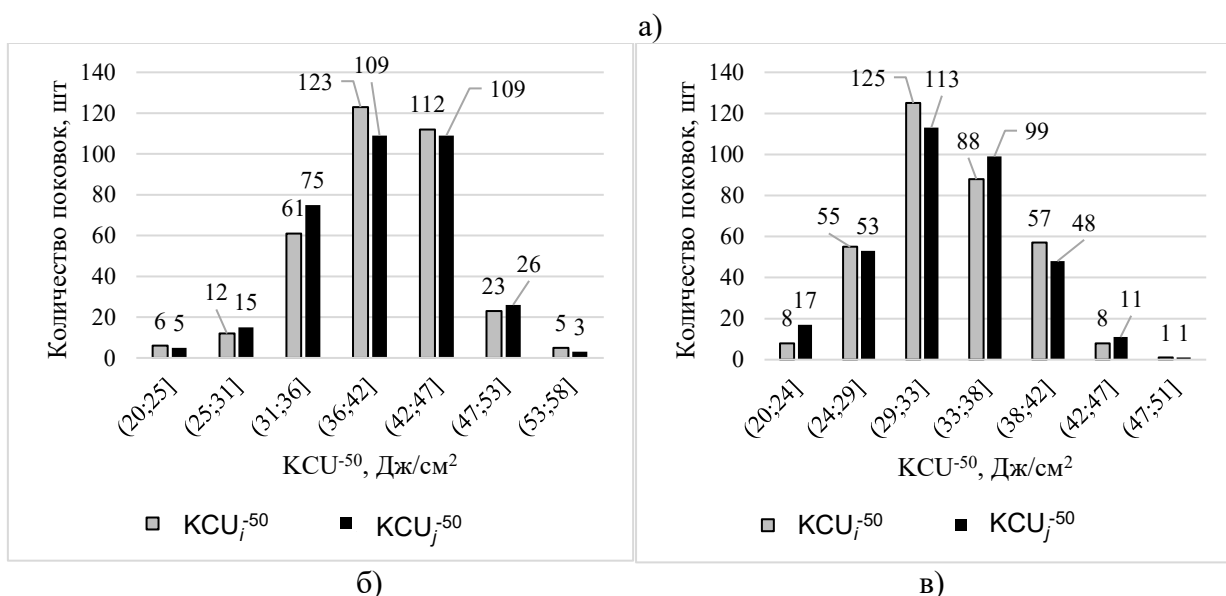
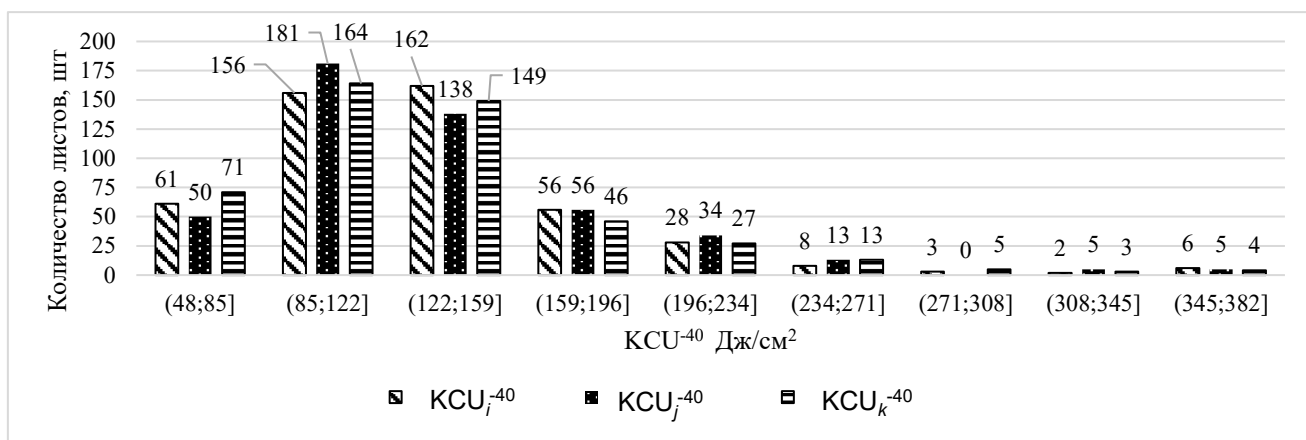


Рисунок 26 – Гистограммы распределения значений ударной вязкости ( $KCU^{-40}$ ) стали 13Г1С-У (толщина листа 8 мм) (а) и стали 38ХНЗМФА-Ш ( $KCU^{-50}$ ) для торцевых темплетов диаметром  $D_s$  (б) и  $D_l$  (в)

Гистограмма распределения ударной вязкости по испытаниям показала относительное асимметричное левостороннее отклонение от нормального вида распределения по стали 13Г1С-У, и относительное правостороннее отклонение от нормального вида распределения данных по стали 38ХНЗМФА-Ш. Для доказательства оценки статистической природы значений применялись коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  (таблица 6-7).

Таблица 6 - Величины коэффициентов эксцесса  $E_x$  и асимметрии  $A_s$  распределения значений механических испытаний в исследуемых листовых стали 13Г1С-У

Толщина листа, мм (Nb > 0,03%)	Коэффициенты	$s$	KCU <sup>-40</sup>			KCV <sup>0</sup>			$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$
			1	2	3	1	2	3			
8	$A_s$	0,33	1,81	1,64	1,54	1,68	1,65	1,64	0,26	0,14	0,12
	$E_x$	1,10	5,29	4,00	3,46	3,40	3,12	3,33	0,36	-0,18	-0,07
10	$A_s$	0,44	0,98	1,19	1,04	1,82	1,57	1,64	0,34	-0,08	0,30
	$E_x$	1,44	1,41	1,97	1,52	4,54	2,92	2,50	1,01	0,28	0,48
12	$A_s$	0,23	1,26	1,37	1,07	1,41	1,51	1,45	0,00	-0,13	-0,28
	$E_x$	0,76	2,38	3,93	1,76	2,36	2,92	2,53	-0,01	0,62	0,90
(Nb ≤ 0,03%)											
8	$A_s$	0,44	0,64	0,65	0,64	0,50	0,60	0,55	0,12	-0,09	-0,27
	$E_x$	1,45	-0,56	-0,49	-0,52	-0,72	-0,65	-0,79	-0,01	1,01	-0,29
10	$A_s$	0,37	0,86	1,10	0,99	0,79	0,95	0,77	0,89	0,68	-1,20
	$E_x$	1,21	0,73	1,89	1,25	0,09	0,95	0,06	1,78	0,41	2,25
12	$A_s$	0,45	0,63	0,79	0,68	0,75	0,78	0,60	1,10	1,21	-0,71
	$E_x$	1,48	0,14	0,51	0,22	-0,07	0,10	-0,45	4,45	6,59	1,43

Таблица 7 - Величины коэффициентов эксцесса  $E_x$  и асимметрии  $A_s$  распределения значений механических испытаний в исследуемых поковках стали 38ХНЗМФА-Ш

	Коэффициенты	$s$	KCU <sup>+20</sup>		KCU <sup>-50</sup>		$\sigma_B$		$\sigma_{0,2}$		$\delta$		$\psi$	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$D_s$	$A_s$	0,39	-0,41	-0,43	-0,37	-0,31	0,29	0,03	0,42	0,11	0,45	0,37	-0,65	-0,56
	$E_x$	1,30	0,70	0,80	0,80	0,73	0,45	-0,10	0,52	0,25	0,95	1,01	0,89	1,01
$D_l$	$A_s$	0,39	0,21	-0,31	0,35	0,14	-0,20	0,01	-0,24	0,03	-0,21	0,28	-0,06	-0,08
	$E_x$	1,30	0,23	-0,14	0,07	-0,03	0,88	0,84	1,98	0,88	0,12	1,09	2,34	2,16

Коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  листовых стали 13Г1С-У, по прочностным характеристикам показал слабую симметричность, по сравнению с характеристиками ударной вязкости с одним образцом на испытания. Полученные результаты по стали 13Г1С-У, варьировалась в пределах (Nb>0,03%, масс.) от 0,98 до 1,82 и 1,41 до 5,29; от 0,50 до 1,10, и -0,79 до 1,89 (Nb≤0,03%, масс.) соответственно. Для распределения значений ударной вязкости (KCU<sup>-50</sup>) крупных поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш - в пределах от -0,37 до 0,35 и от -0,03 до 0,80.

В результате анализа коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ , показали значимость, при одинаковом виде распределения. Однако один образец значимо может не отличаться от трех (рисунок 26), потому что он входит в массу объема выборки образцов, однако между различными группами образцов (1-2, 1-3, 2-3) по значимости может быть разница. Это говорит о том, что коэффициентов асимметрии и эксцесса недостаточно для

описания объёма и вида распределения для грубой оценки. Для значимой оценки симметричности, предпочтительнее использовать для сравнения непараметрическую статистику, который более спокоен к распределению, а точнее по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ) (таблица 8-9).

Таблица 8 - Сопоставление различных пар выборок ударной вязкости (полученных при их попарном извлечении из результатов штатной оценки вязкости по трем образцам на партию) по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), сталь 13Г1С-У\* (содержание Nb>0,03 %, масс) [130].

Ударная вязкость	Толщина листа, мм	Экспериментальные значения критериев/ уровень риска для пар результатов испытания					
		1 - 2		1 - 3		2 - 3	
		$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$
КСУ <sup>-40</sup>	8	<u>0,741</u> 0,64	<u>0,157</u> 0,90	<u>0,870</u> 0,43	<u>0,521</u> 0,70	<u>0,870</u> 0,43	<u>0,679</u> 0,50
	10	<u>0,513</u> 0,95	<u>0,091</u> 0,90	<u>0,427</u> 0,99	<u>0,115</u> 0,90	<u>0,470</u> 0,98	<u>0,025</u> 0,90
	12	<u>0,509</u> 0,95	<u>0,437</u> 0,70	<u>0,464</u> 0,98	<u>0,345</u> 0,80	<u>0,553</u> 0,92	<u>0,096</u> 0,90
КСУ <sup>0</sup>	8	<u>0,322</u> 0,99	<u>0,094</u> 0,90	<u>0,322</u> 0,99	<u>0,175</u> 0,90	<u>0,419</u> 0,99	<u>0,080</u> 0,90
	10	<u>0,557</u> 0,91	<u>0,217</u> 0,90	<u>0,514</u> 0,95	<u>0,215</u> 0,90	<u>0,729</u> 0,66	<u>0,429</u> 0,70
	12	<u>0,553</u> 0,92	<u>0,165</u> 0,90	<u>0,664</u> 0,77	<u>0,420</u> 0,70	<u>0,487</u> 0,97	<u>0,254</u> 0,80

\* выделены ячейки таблицы с отличающимися результатами сравнения выборок по двум критериям.

Таблица 9 - Степень отличия ударной вязкости по результатам её определения на одном из образцов из исходной выборки (2 образца): по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), сталь 38ХНЗМФА-Ш\* для торцевых темплетов диаметром  $D_l$  и  $D_s$ .

По размаху между испытаниями	$D_s$		$D_l$		Сравнение размаха между $D_l$ и $D_s$	
	1-2		1-2		$C_n$	$C_p$
	$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$		
КСУ <sup>+20</sup>	<u>0,306</u> 0,30	<u>0,222</u> 0,90	<u>0,574</u> 0,90	<u>0,857</u> 0,40	<u>0,612</u> 0,85	<u>0,750</u> 0,50
КСУ <sup>-50</sup>	<u>0,612</u> 0,85	<u>0,241</u> 0,90	<u>0,535</u> 0,93	<u>0,655</u> 0,50	<u>1,147</u> 0,14	<u>2,826</u> 0,01
$\sigma_{0,2}$ , МПа	<u>0,459</u> 0,98	<u>0,337</u> 0,80	<u>0,422</u> 0,99	<u>0,070</u> 0,90	<u>0,558</u> 0,92	<u>1,041</u> 0,50
$\sigma_B$ , МПа	<u>0,535</u> 0,93	<u>0,482</u> 0,70	<u>0,460</u> 0,98	<u>0,035</u> 0,90	<u>0,546</u> 0,93	<u>0,337</u> 0,80
$\delta$ , %	<u>0,382</u> 0,99	<u>0,342</u> 0,80	<u>0,652</u> 0,79	<u>0,957</u> 0,40	<u>0,783</u> 0,57	<u>0,896</u> 0,40
$\psi$ , %	<u>0,382</u> 0,99	<u>0,111</u> 0,90	<u>0,499</u> 0,96	<u>0,163</u> 0,90	<u>0,465</u> 0,98	<u>1,019</u> 0,40

\* выделены ячейки таблицы с отличающимися результатами сравнения выборок по двум критериям.

Проверяемая по критерию t-Стьюдента и Смирнова гипотеза вероятности совпадений, показала схожесть выборок между собой. Большинство полученных

критических точек (абсолютные значения) указывают на схожесть выборок по двум критериям. Лишь степень различия между вторым и третьим образцом по толщине листа 8 мм., указывает на различия выборок по двум критериям. Также показано, что не всегда наблюдается соответствие между результатами оценок по двум критериям (ячейки выделены серым цветом). Это признак различий в статистической природе объектов сравнения. Очевидно, что применение двух и более образцов для испытания единицы продукции должно повысить полноту аттестации её качества (по сравнению с одним образцом). Однако при этом неизбежны сложности при выборе значения, характеризующего показатель качества металлопродукции в целом [128].

#### **Соотношение результатов оценки ударной вязкости (КСУ) по результатам испытаний двух или трех образцов на единицу продукции.**

Обычно на производстве изготовитель ограничивается двумя образцами для испытания каждого из механических свойств, но это приводит к возникновению объективных сложностей при сопоставлении качества продукции.

В исследуемой базе данных заводского контроля технологии получения листовой стали 13Г1С-У, качество листа характеризуют результаты испытаний трех образцов, это говорит о том, что отбор трех образцов для испытания единицы продукции, даст не только возможность оценить ошибку среднего  $s$ , но и позволит более объективно оценить неоднородность качества продукции, не только по величине среднеквадратичного отклонения, но и по уровню размаха  $\Delta$  [128].

Для более полного извлечения информации о качестве металлопродукции полезно использование не только средних значений, но и величины размаха  $\Delta = x_{\max} - x_{\min}$ . Средние значения ( $\bar{x}$ ) могут быть одинаковыми при различном размахе, в свою очередь при одном и том же размахе значение среднего отличается (рисунок 27).

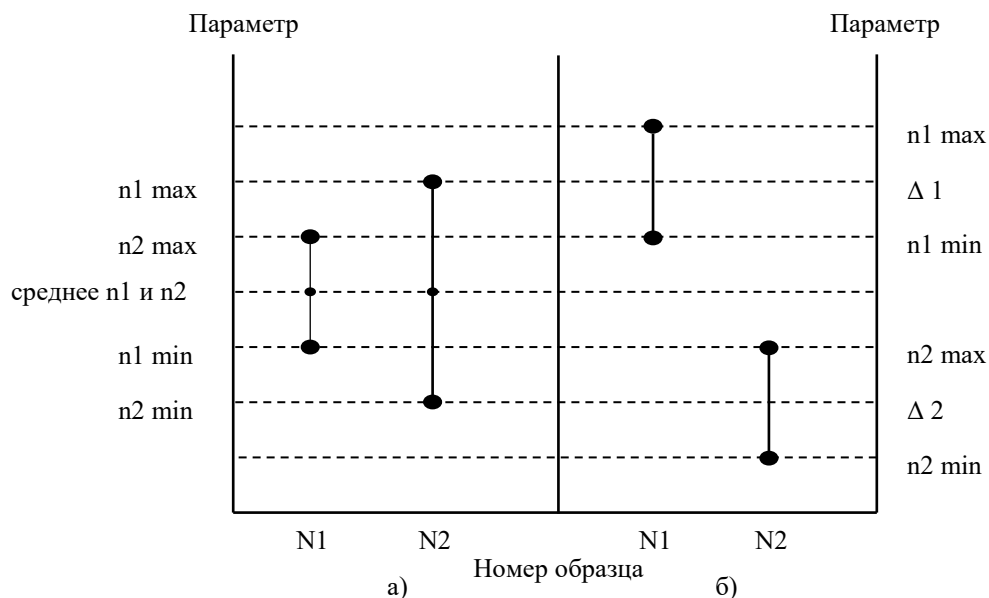


Рисунок 27 - Объективные сложности при сопоставлении качества металлопродукции: а – первый вариант разброса параметров; б – второй вариант разброса параметров

При одинаковом виде распределения первого и второго испытания значений ударной вязкости (KCU) размах ( $\Delta$ ) между ними и их среднее значение ( $\bar{x}$ ) может варьироваться в широких пределах (рисунок 28-29).

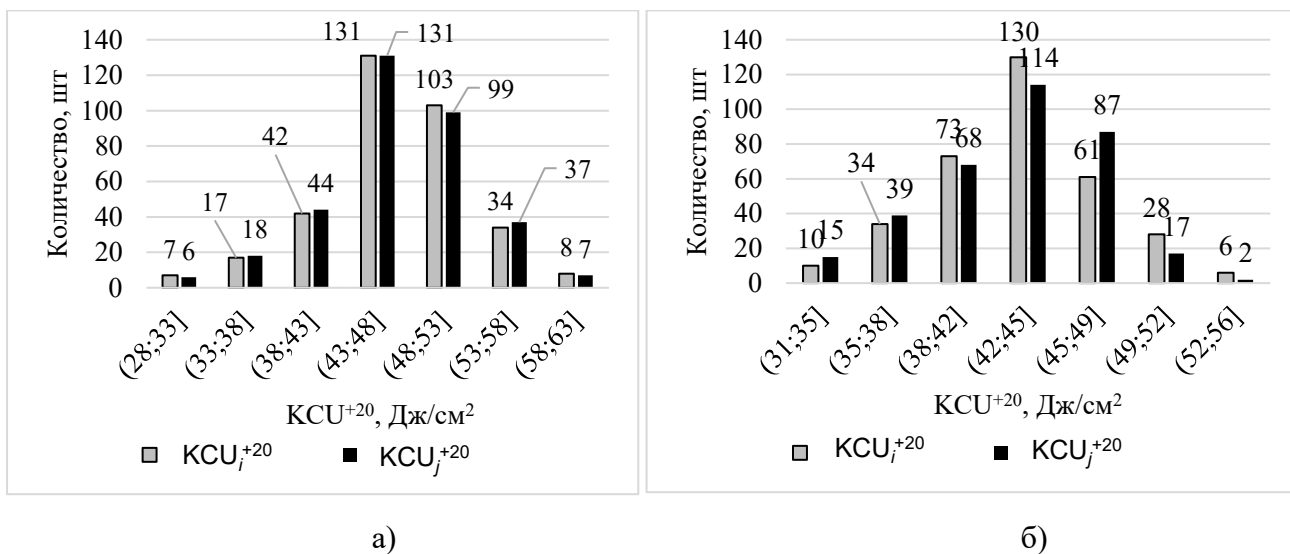


Рисунок 28 - Гистограммы распределения ударной вязкости  $KCU^{+20}$  крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, для торцевых темплетов диаметром  $D_s$  (а) и  $D_l$  (б)

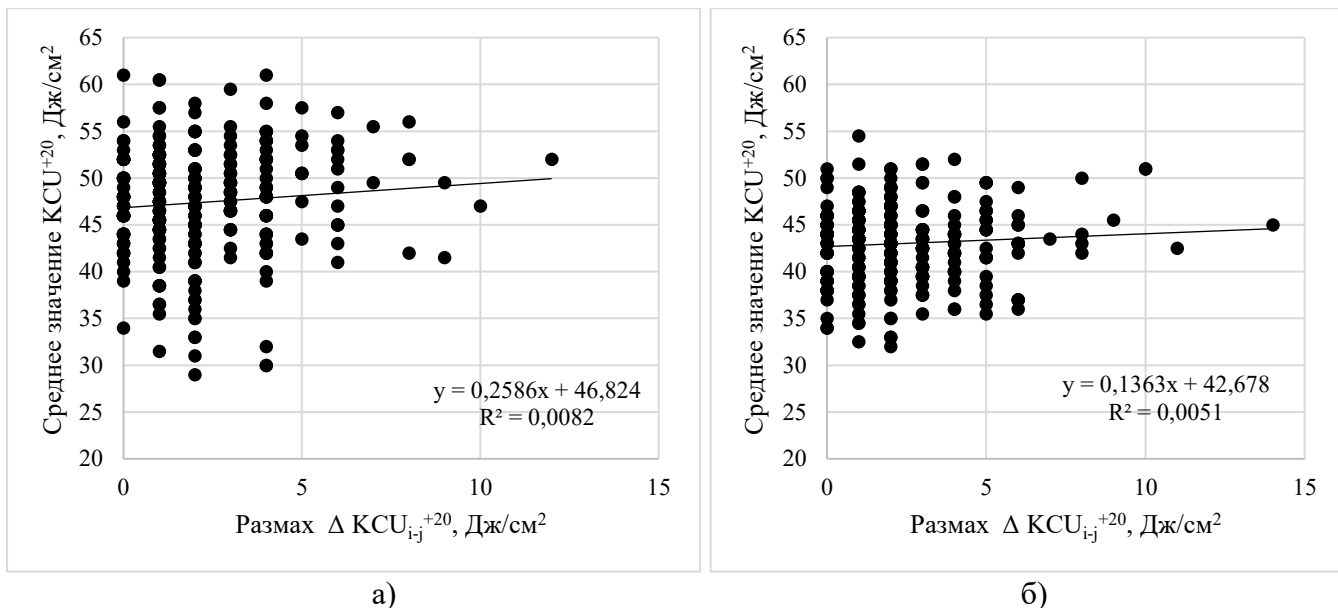


Рисунок 29 - Соотношение средних значений к размахам ударной вязкости  $КСУ^{+20}$  крупных поковок стали 38ХНЗМФА-Ш, для торцевых темплетов диаметром  $D_s$  (а) и  $D_l$  (б)

Анализ вида распределения ударной вязкости выявил наличие положительной и отрицательной асимметрии: коэффициент асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  варьировался от -0,43 до 0,21, и от -0,14 до 0,80 по стали 38ХНЗМФА-Ш. Для поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш сочетание двух ударных образцов из  $D_l$  и  $D_s$  темплетов поковок было единственным, отсюда не ясно, в какой мере могли бы отличаться характеристики ударной вязкости при большем наборе парных сочетаний. С этой целью была использована база данных стали 13Г1С-У (лист толщиной 12 мм), где от каждой партии листов отбиралось и испытывалось по три ударных образца.

Отсюда было проведено исследование по листовой стали 13Г1С-У, по количественной оценке, свойств листа как по трём, так и по двум образцам на точку (причем по трем вариантам их комбинаций: 1–2; 1–3 и 2–3 испытания). Одновременно также была оценена сопоставимость различных пар параметров образцов: 1-2; 1-3; 2-3 к всем 3 образцам. Построение распределений величин размахов  $\Delta КСУ^{-40}$  по результатам всех трех испытаний (для каждой партии листов из стали 13Г1С-У толщиной 12 мм) или возможных сочетаний пар результатов, выбранных из них ( $\Delta_{i-j}$ ,  $\Delta_{i-k}$  и  $\Delta_{j-k}$  – индексы соответствуют номерам столбцов в матрице данных), при единой разбивке на разряды, позволило сопоставить их (рисунок 30).

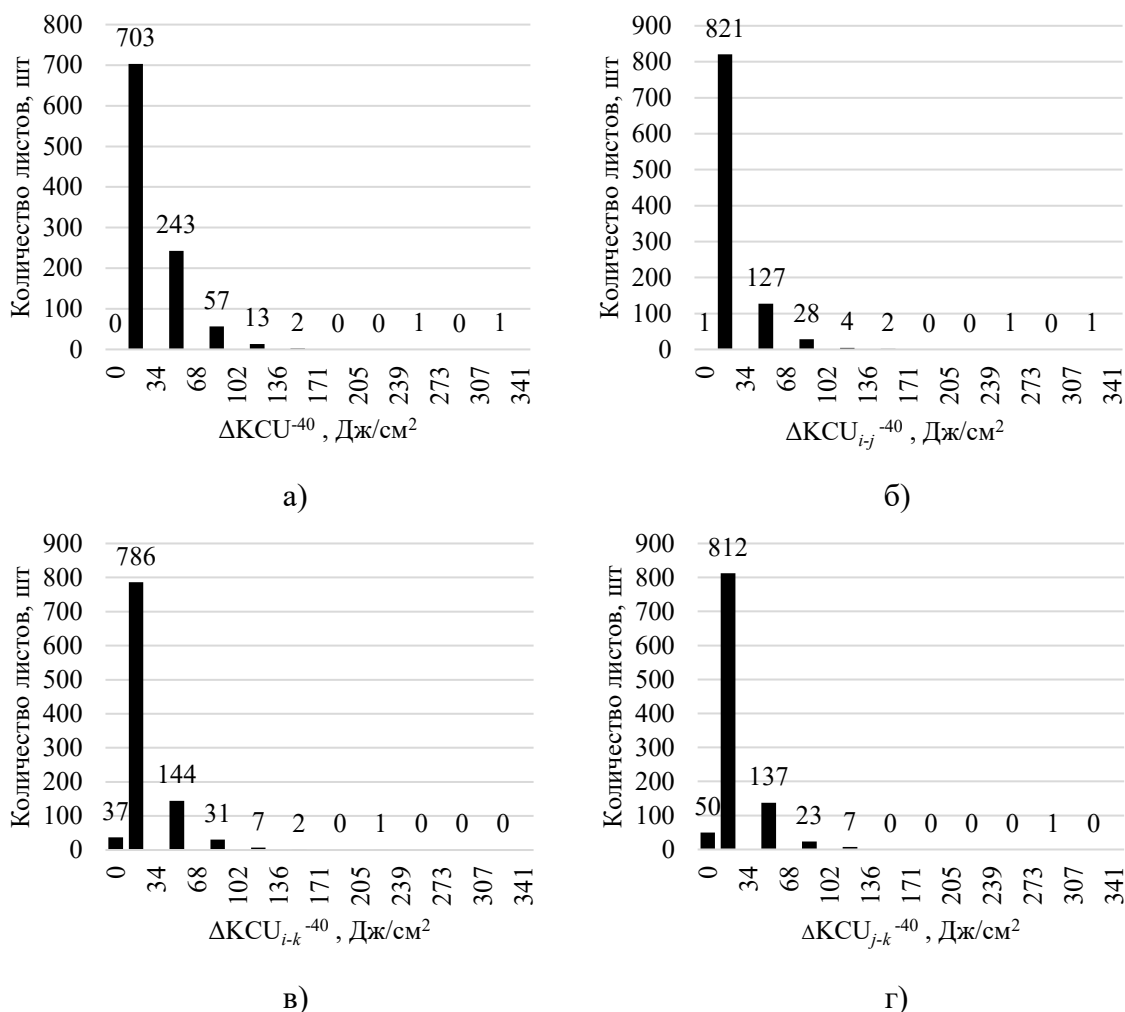


Рисунок 30 - Гистограммы распределения значений размахов ударной вязкости  $\Delta KCU^{-40}$  стали 13Г1С-У (толщина листа 12мм), рассчитанные по трем ( $\Delta KCU^{-40}$ ) – (а) и двум ( $\Delta KCU^{-40}$ ) – (б, в, г) образцам (от каждой партии – единицы контролируемой продукции), (содержание Nb>0,03 % масс).

Анализ гистограмм распределения размаха показал расположение основного массива данных в левой части, указывая на правостороннее распределение. Это когда большое количество значений, имеющих малый размах, и наличием нулевого размаха (когда абсолютные значения ударной вязкости равны между собой). Это подтверждается коэффициентами асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ . (таблица 10).

Таблица 10 - Коэффициенты эксцесса  $E_x$  и асимметрии  $A_s$  выборок величин размахов ударной вязкости  $\Delta = KCU(KCV)_{max} - KCU(KCV)_{min}$  листовой стали 13Г1С-У для трех образцов  $\Delta$  и выборок возможных сочетаний пар ( $\Delta_{i-j-k}$ ) из этих же образцов, (содержание Nb>0,03%, масс)

Толщина листа, мм	Коэффициенты асимметрии и эксцесса	$\Delta = KCU(KCV)_{max} - KCU(KCV)_{min}$							
		$KCU^{-40}$				$KCV^0$			
		$\Delta$	$\Delta_{i-j}$	$\Delta_{i-k}$	$\Delta_{j-k}$	$\Delta$	$\Delta_{i-j}$	$\Delta_{i-k}$	$\Delta_{j-k}$
8	$A_s$	2,02	2,40	2,40	2,55	2,48	3,02	2,69	3,25
	$E_x$	5,19	8,17	7,53	8,57	7,37	11,28	9,37	13,89



10	$A_s$	1,20	1,67	1,72	1,45	1,75	1,94	1,76	2,26
	$E_x$	1,22	3,14	3,17	2,38	4,55	5,11	4,38	7,39
12	$A_s$	1,25	1,74	1,58	1,70	1,76	2,11	2,05	2,36
	$E_x$	1,34	3,62	2,56	3,48	3,52	5,72	5,12	7,32

При близком характере гистограмм распределения их статистические характеристики - коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  варьировались в диапазоне от 1,58 до 2,36 (ошибка определения 0,23) и от 2,56 до 7,32 (ошибка определения 0,76) соответственно. Добавление результатов третьего испытания привело к уменьшению величин коэффициентов  $A_s$  и  $E_x$ : 1,25 и 1,34 соответственно.

Высокие коэффициенты асимметрии и эксцесса указывают на однородность данных между испытаниями. Отсюда появляется гипотеза схожести выборок между собой. Проверка гипотезе осуществлялась при помощи критериев Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), которые опровергнут схожесть испытаний между собой (таблица 11).

Таблица 11 - Оценка риска гипотезы о различии выборок размаха ударной вязкости между парами образцов по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), сталь 13Г1С-У (содержание Nb>0,03 % масс)

Параметры	Кол-во, шт	Экспериментальные значения критериев/ уровень риска для пар результатов испытания					
		$\Delta$ к $\Delta_{i-j}$		$\Delta$ к $\Delta_{i-k}$		$\Delta$ к $\Delta_{j-k}$	
КСУ <sup>-40</sup>		$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$
Толщина листа, мм							
8	482	<u>3,801</u> <0,0001	<u>6,022</u> <0,0001	<u>3,414</u> <0,0001	<u>4,61</u> <0,0001	<u>4,187</u> <0,0001	<u>7,087</u> <0,0001
10	273	<u>3,033</u> <0,0001	<u>5,742</u> <0,0001	<u>2,777</u> <0,0001	<u>5,073</u> <0,0001	<u>3,033</u> <0,0001	<u>5,76</u> <0,0001
12	1021	5,618 <0,0001	<u>9,428</u> <0,0001	<u>5,286</u> <0,0001	<u>8,84</u> <0,0001	<u>5,884</u> <0,0001	<u>10,073</u> <0,0001
КСV <sup>0</sup>							
8	482	<u>3,929</u> <0,0001	<u>5,550</u> <0,0001	<u>3,124</u> <0,0001	<u>4,215</u> <0,0001	<u>3,844</u> <0,0001	<u>5,577</u> <0,0001
10	273	<u>2,777</u> <0,0001	<u>4,602</u> <0,0001	<u>2,862</u> <0,0001	<u>4,064</u> <0,0001	<u>2,734</u> <0,0001	<u>3,647</u> <0,0001
12	1021	<u>5,353</u> <0,0001	<u>8,894</u> <0,0001	<u>4,977</u> <0,0001	<u>7,270</u> <0,0001	<u>5,972</u> <0,0001	<u>9,933</u> <0,0001

Сопоставление схожести данных между собой по всем парам, показали варьирование полученных экспериментальных значений критериев от 2,77, до 5,88, и от 3,67, до 10,07, где табличный показатель был равен <0,0001. Проведение анализа двух

различных размахов между собой (таблица 12), помогло показать, что выборка проведенного дополнительно одного испытания к паре, может сильно повлиять на конечный результат анализа.

Таблица 12 - Оценка риска гипотезы о различии выборок размаха ударной вязкости между пар образцов по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), сталь 13Г1С-У\* (содержание Nb>0,03 % масс)

Параметры	Экспериментальные значения критериев/ уровень риска для пар результатов испытания						
	Кол-во, шт	$\Delta_{i-j}$ к $\Delta_{i-k}$		$\Delta_{i-j}$ к $\Delta_{j-k}$		$\Delta_{i-k}$ к $\Delta_{j-k}$	
КСУ <sup>-40</sup>		$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$	$C_n$	$C_p$
8	482	<u>0,644</u> 0,80	<u>1,156</u> 0,30	<u>0,644</u> 0,80	<u>0,775</u> 0,50	<u>0,902</u> 0,39	<u>1,945</u> 0,10
10	273	<u>0,726</u> 0,66	<u>0,404</u> 0,70	<u>0,470</u> 0,98	<u>0,103</u> 0,90	<u>0,940</u> 0,34	<u>0,521</u> 0,70
12	1021	<u>0,686</u> 0,80	<u>0,93</u> 0,40	<u>0,531</u> 0,94	<u>0,261</u> 0,80	<u>0,863</u> 0,45	<u>1,248</u> 0,30
КСV <sup>0</sup>							
8	482	<u>1,256</u> 0,08	<u>1,208</u> 0,30	<u>0,322</u> 0,99	<u>0,240</u> 0,90	<u>1,031</u> 0,23	<u>1,437</u> 0,20
10	273	<u>0,299</u> 1,00	<u>0,294</u> 0,80	<u>0,641</u> <u>0,80</u>	<u>0,807</u> <u>0,50</u>	<u>0,641</u> 0,80	<u>0,473</u> 0,70
12	1021	<u>0,841</u> 0,48	<u>1,393</u> 0,20	<u>1,327</u> <u>0,06</u>	<u>0,852</u> <u>0,40</u>	<u>1,194</u> 0,11	<u>2,25</u> 0,05

\* выделены ячейки таблицы с отличающимися результатами сравнения выборок по двум критериям.

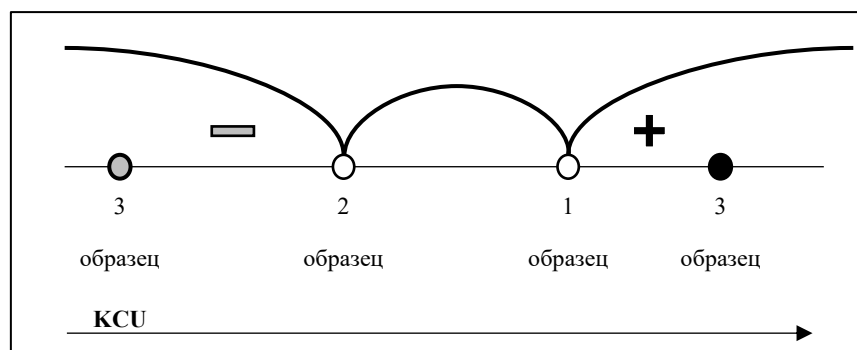
Критерии Смирнова и Стьюдента выявили различия между значениями размаха 2 образцов разных пар. В 9 вариантах сравнения пар из возможных 18 вариантов (три варианта выборок  $\Delta_{i-j}$ ,  $\Delta_{i-k}$  и  $\Delta_{j-k}$  для трех толщин листа 8,10 и 12 мм. и двух типов ударной вязкости КСУ<sup>-40</sup> и КСV<sup>0</sup> стали 13Г1С-У) риск гипотезы о различии выборок по двум критериям варьировался в интервале от 0,22 до 0,50. При сравнении 9 пар из 18 пар было выявлено их статистическое соответствие, в шести и трех случаях с риском не более 0,20 и 0,30 (хотя бы по одному из критериев) соответственно, выборки пар отличались (для всех толщин листа и видов ударной вязкости) [128].

Это говорит о том, что нельзя использовать отдельно критерии, а нужно применять совокупность статистических методов, для объективной оценки причин неоднородности металлопродукции. Сравнительный анализ значений размахов двух и трех образцов позволил оценить меру соотношения совпадений размаха между выборками (таблица 13).

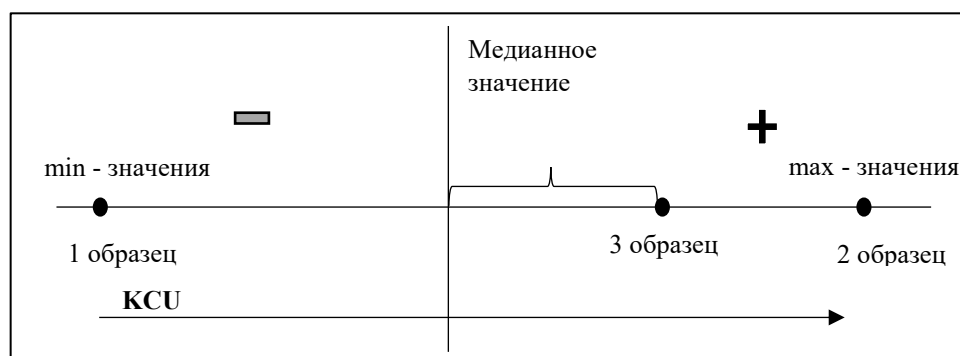
Таблица 13 - Соотношение совпадений размаха  $\Delta KCU$  между различными парами образцов стали 13Г1С-У, %

Вариации комбинаций размаха ( $\Delta$ )	Процент совпадений, %
Толщина листа 8 мм.	
$\Delta$ к $\Delta_{i-j}$	35,3%
$\Delta$ к $\Delta_{i-k}$	42,3%
$\Delta$ к $\Delta_{j-k}$	39,0%
Толщина листа 10 мм.	
$\Delta$ к $\Delta_{i-j}$	38,8%
$\Delta$ к $\Delta_{i-k}$	43,6%
$\Delta$ к $\Delta_{j-k}$	37,7%
Толщина листа 12 мм.	
$\Delta$ к $\Delta_{i-j}$	36,5%
$\Delta$ к $\Delta_{i-k}$	39,4%
$\Delta$ к $\Delta_{j-k}$	36,5%

Анализ абсолютных значений размахов для трех образцов были больше парных размахов пар образцов  $\Delta_{i-j}$ ,  $\Delta_{i-k}$  и  $\Delta_{j-k}$ , в 56,4-67,7 % случаев (для всех толщин и партий листов) [128]. То есть для большинства листов проведение третьего испытания дает возможность получить дополнительную информацию, которая отражает настоящий разброс ударной вязкости. Информация по третьему испытанию может как ухудшить, так и улучшить данные показатели по приемо-сдаточным параметрам. Но стоит учитывать, что информация от третьего испытания может находиться ниже или выше значений первого и второго испытания (рисунок 31а), также или в пределах первого и второго образца (рисунок 31б).



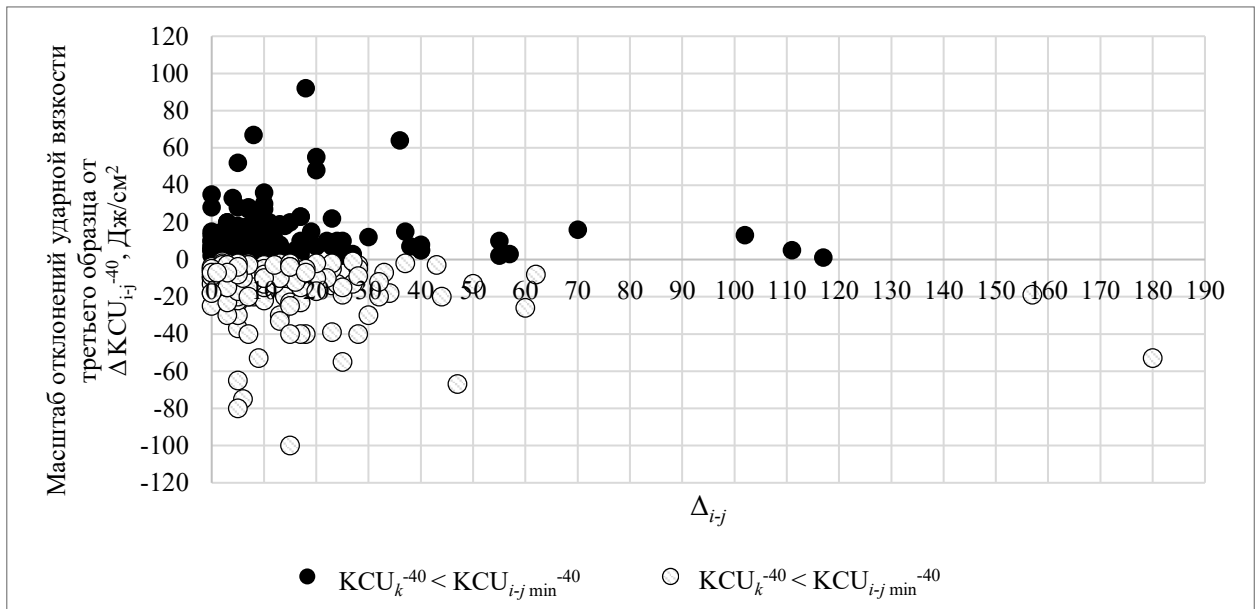
а)



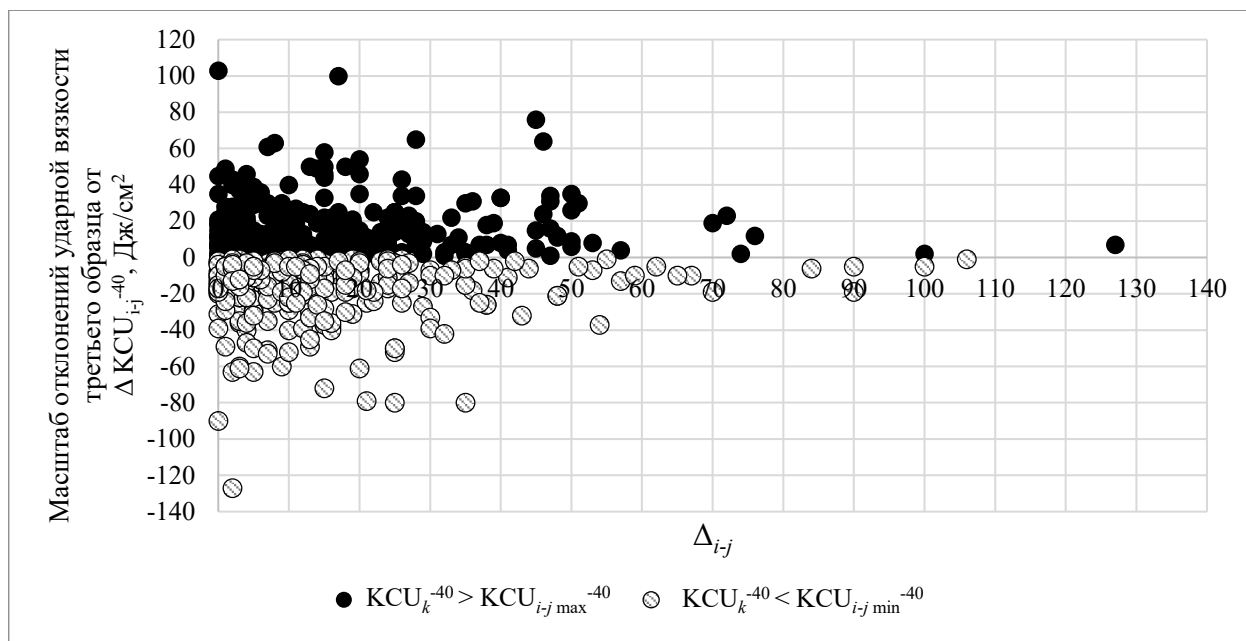
б)

Рисунок 31 - Возможные варианты отклонения значения ударной вязкости третьего образца (по её абсолютному значению) относительно первого и второго образцов: вне диапазона их значений (а) и внутри диапазона их значений ударной вязкости с привязкой к медианному значению первого и второго образцов (б), сталь 13Г1С-У (содержание Nb>0,03 %, масс., толщина листа 12 мм).

Масштаб отклонений ударной вязкости третьего образца (и его знак) и размах значений ударной вязкости ( $KCU^{-40}$ ), относительно сопутствующей ему пары образцов представлен на рисунке 32 на примере листа толщиной 12мм из стали 13Г1С-У (содержание Nb>0,03 %, масс.). Серым цветом выделены значения ударной вязкости третьего образца, которые находятся меньше уровня ударной вязкости пары образцов. Чёрным цветом выделено расположение значений тех третьих образцов, у которых по шкале ударной вязкости значения больше соответствующих значений пар образцов.



а)

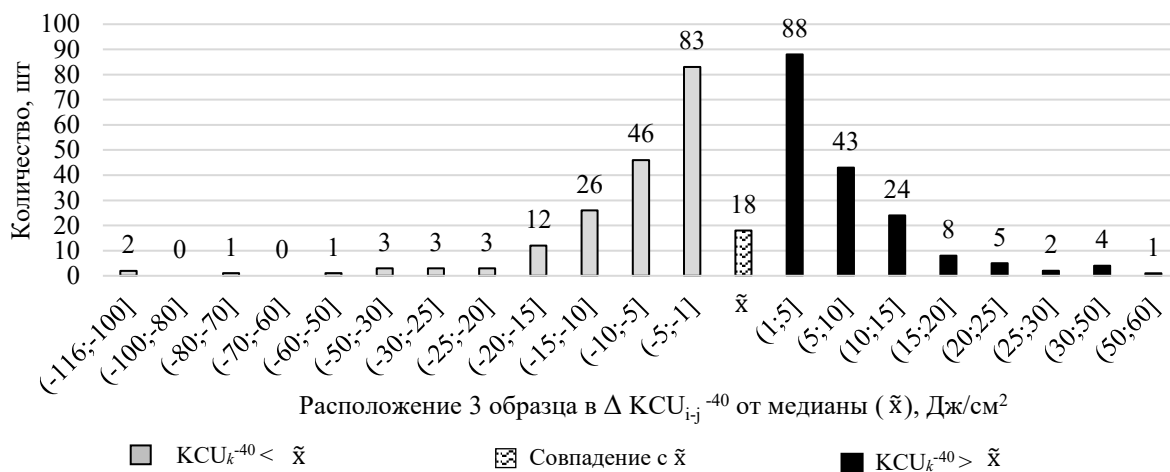


б)

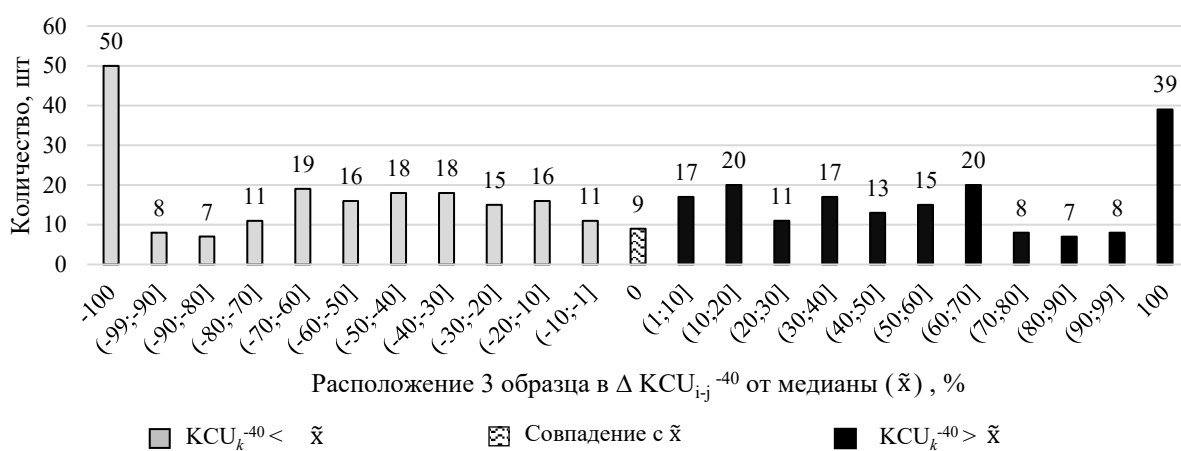
Рисунок 32 – Взаимосвязь отклонений значений ударной вязкости третьего образца  $KCU_k^{-40}$  относительно значений ударной вязкости, полученных при испытании двух образцов  $KCU_i^{-40}$  и  $KCU_j^{-40}$  (для выборок  $\{KCU_i^{-40}\}$  и  $\{KCU_j^{-40}\}$ ) – вне интервала их значений, сталь 13Г1С-У, толщина листа 8мм (а), и 12мм (б)

Для большинства листов отклонение по абсолютным значениям небольшое (до 20 Дж/см<sup>2</sup>), но наблюдаются и большие отклонения, которые могут достигать значений 127 и 180 Дж/см<sup>2</sup>. В процентном соотношении основной массив данных лежит в интервале от 0 до 40 %, но порядка 20 % от выборки может иметь отклонения в обоих случаях, то есть возможны отклонения как в меньшую, так и в большую сторону.

В интервал парных значений ударной вязкости  $[KCU_i^{-40}; KCU_j^{-40}]$  третий образец «попадал» от 373 до 402 раз (36,5 - 39,4 % от общего числа партий), из них от 180 до 184 значений вязкости были меньше медианных значений  $\tilde{x} = (KCU_i^{-40} + KCU_j^{-40})/2$ , а от 175 до 202 значений – больше (рисунок 33а) [128]. Диаграмма отклонения значений третьего образца от медианного представлена на рисунке 33б, в абсолютных значениях.



а)



б)

Рисунок 33 - Распределение отклонений значений ударной вязкости третьего образца  $KCU_k^{-40}$  относительно значений ударной вязкости, полученных при испытании двух образцов  $KCU_i^{-40}$  и  $KCU_j^{-40}$  (для выборок  $\{KCU_i^{-40}\}$  и  $\{KCU_j^{-40}\}$ ), в пределах этого интервала – относительно медианного значения  $\tilde{x} = (KCU_i^{-40} + KCU_j^{-40})/2$ , в Дж/см<sup>2</sup> (а), в % (б), сталь 13Г1С-У, толщина листа 12мм

Результаты диаграмм показывают, что распределения имеет случайный характер, возможны отклонения в обе стороны от медианного значения ( $\tilde{x}$ ). Совпадение с медианными значениями было в пределах от 1,6 до 1,8 % и фактически трансформировало его в среднее значение по партии, а все остальные значения, так или иначе, изменяли оценку ударной вязкости партии. В целом, отсюда вытекает и масштаб рисков при обратных действиях, в том случае, когда решается задача, связанная с уменьшением количества образцов, используемых для оценки ударной вязкости отдельных партий листа, с трех до двух единиц [128]. Однако в сталях с развитой неоднородностью структурой далеко не всегда использование даже трех образцов для аттестации качества металлопродукции, в первую очередь вязкости, может обеспечить получение объективных оценок [128].

### Соотношение результатов оценки двух или одного испытания.

Наличие второго образца повышает информативность, но это может, как повысить, так и понизить характеристики приемно-сдаточных параметров. Невозможно оценить масштабы неоднородности механических свойств в пределах одного образца на листе, из-за чего и существует ГОСТ 1497-2023 пункт 4.2.1., но есть ГОСТ 9454-78 где вообще отсутствует информация про количество образцов. Отсюда и появляется интерес при выборе количества испытаний между двух и одного образца. Так же появился интерес оценить риск потери информации при выборе одного, а также какой процент распределения второго образца по отношению к первому образцу (рисунок 34).

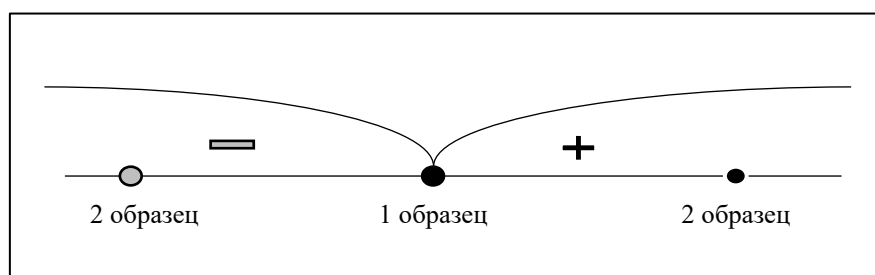
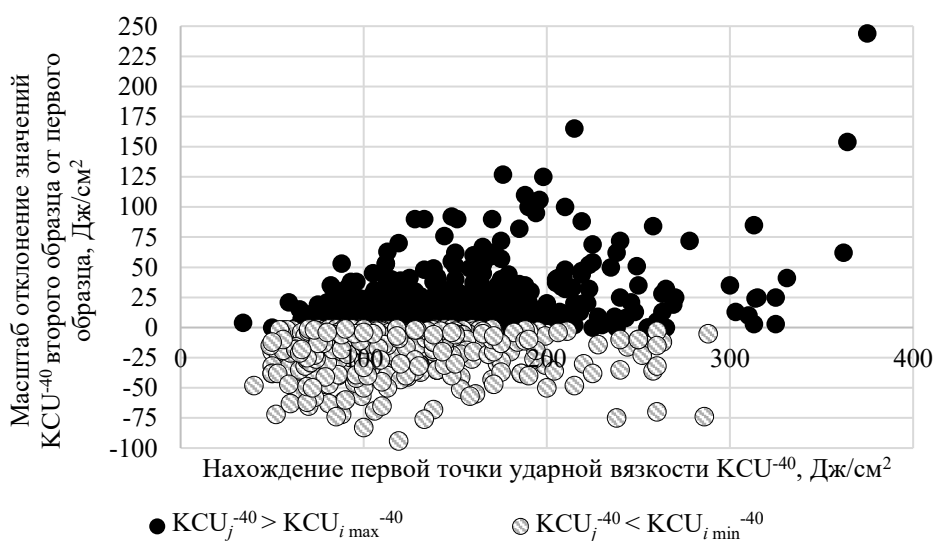
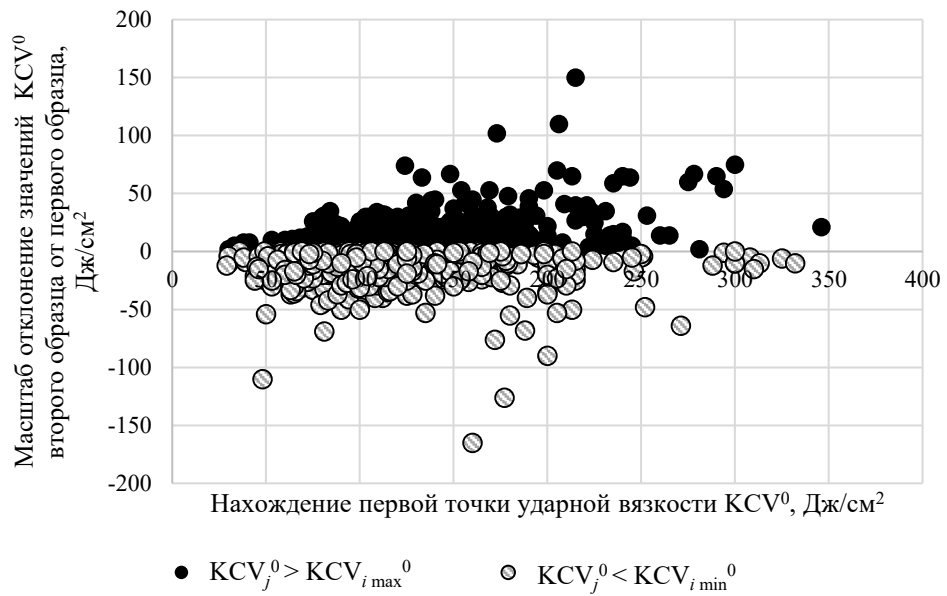


Рисунок 34 - Схематическое представление

Оценены риски уменьшения количества образцов для приемно-сдаточных испытаний с двух до одного испытания. Полученные данные по отклонению второй точки от первой, представле на рисунке 35.



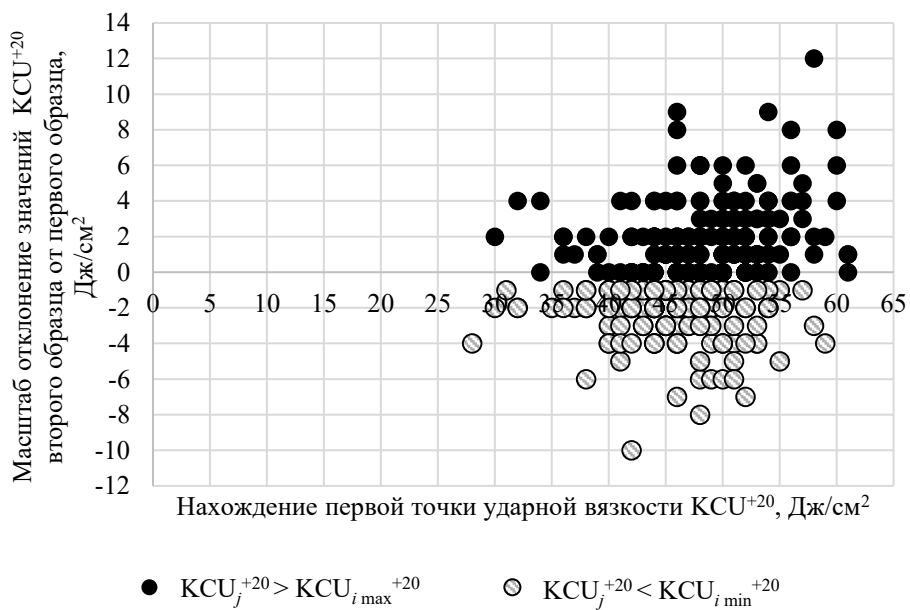
а)



б)

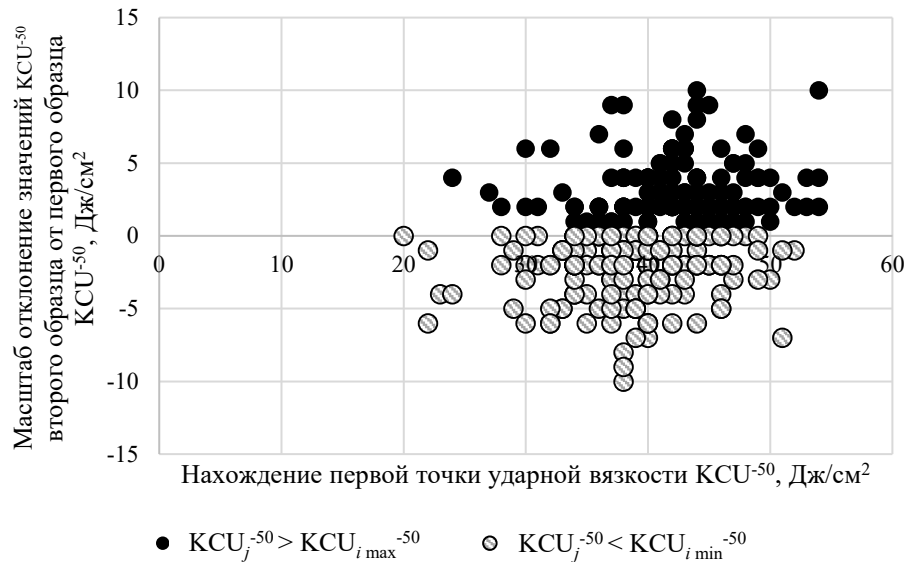
Рисунок 35 - Распределение отклонения значений ударной вязкости  $KCU(V^0)^{-40}$  2-го от 1-го образца  $KCU(V^0)^{-40}$  по толщине листа 12мм, ( $Nb > 0,03\%$  масс), листовой сталь 13Г1С-У, в Дж/см<sup>2</sup>

Проведена оценка риска проведения второго испытания в стали 38ХНЗМФА-Ш (рисунок 36).

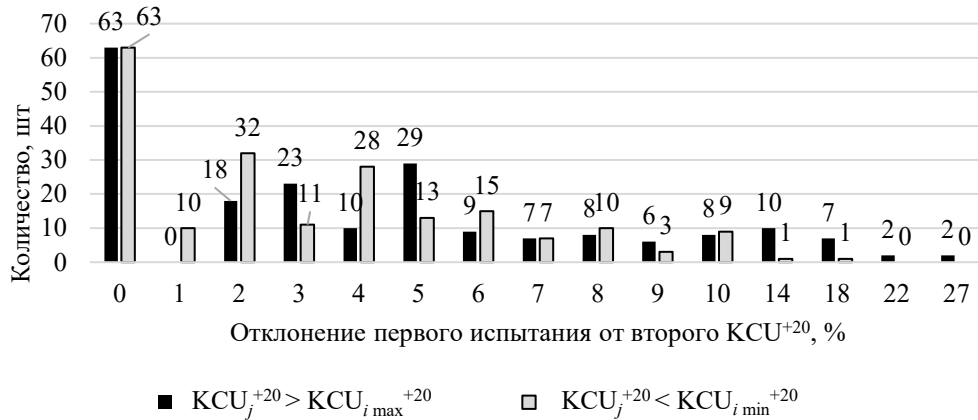


а)

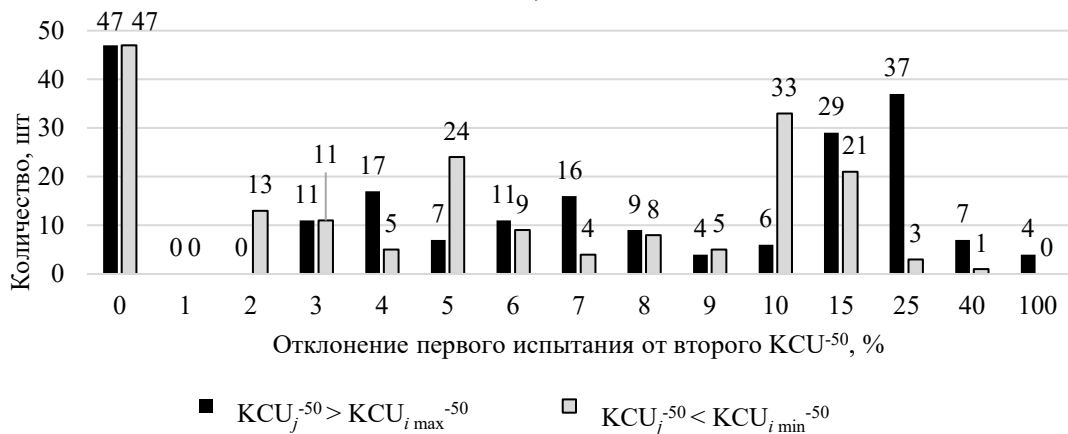




б)



в)



г)

Рисунок 36 - Распределение отклонения значений ударной вязкости  $KCU^{(+20)^{-50}}$  2-го от 1-го образца  $KCU^{(+20)^{-50}}$  сталь 38ХНЗМФА-Ш,  $D_s$  (а) и  $D_l$  (б), в Дж/см<sup>2</sup>;  $D_s$  (в) и  $D_l$  (г), в %

Анализ выбора сопоставление результатов испытания одного или двух образцов на точку не только подтвердил, что испытание двух образцов предпочтительнее, но и позволил оценить возможные риски и масштабы потери информации при переходе от схемы определения качества с двух на один образец. Потеря или добавление новой информации

несет в себе природу распределения чисел случайного характера, которая может иметь взаимосвязи между управляющими и приемо-сдаточными параметрами. При оценке ударной вязкости таких сталей традиционно наблюдается большой разброс вязкости, причем во всем диапазоне температур испытания. Это вносит неопределенность в оценку вязкости, в т.ч. и в определение их хладостойкости. В этой связи перспективным может оказаться использование микрообразцов, при сопоставимости габаритов которых с масштабом структурной неоднородности можно получить оценки хладостойкости отдельных структурных составляющих, ранжировать их по степени опасности, определяя энергию хрупкого разрушения по измерениям акустической эмиссии [128,130].

Это важно для понимания причин разброса вязкости при использовании стандартных схем испытаний. Именно такой подход позволил показать, что в крупных поковках из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш в интервале от  $-130$  до  $100$  °С хрупко разрушается только межосевое пространство, а ниже  $-130$  °С хрупко разрушаются и оси дендритов. Различия же в рисунке дендритной структуры от одного ударного образца к другому (включая их дальние последствия в микроструктуре и морфологии НВ [1]) приводят к повышенному разбросу вязкости при всех температурах испытания и риску прогноза хладостойкости [128].

На основе статистического анализа представительных баз данных производственного контроля технологии получения листовой стали 13Г1С-У (толщина листа 8, 10 и 12 мм) и крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш выделены факторы, определяющие различие в оценке их качества при приемо-сдаточных испытаниях с использованием различного количества образцов на единицу продукции (партия, поковка): вариация фиксируемого разброса свойств (размах значений); изменение статистической природы вида распределения значений свойств (вариация величин коэффициентов асимметрии и эксцесса); объем анализируемой выборки [128].

Также показано, что при статистическом анализе баз данных производственного контроля существенное значение для исключения побочных эффектов, снижающих информативность результатов приемо-сдаточных испытаний, играет соответствующая подготовка массива данных, направленная на исключение влияния трендов, сезонных колебаний, выбросов и т.п.

### 3.4 Оценка возможностей классической статистики для выявления факторов неоднородности качества (в пределах поля допуска технологического процесса)

Важным этапом при статистическом анализе является предварительная обработка данных, которая направлена на структурирование параметров технологической цепочки производства. Так, в частности, в базе данных стали 15ХСНД несколько листов из одной плавки имеют одинаковый химический состав и при этом различные значения приемосдаточных параметров (рисунок 37).

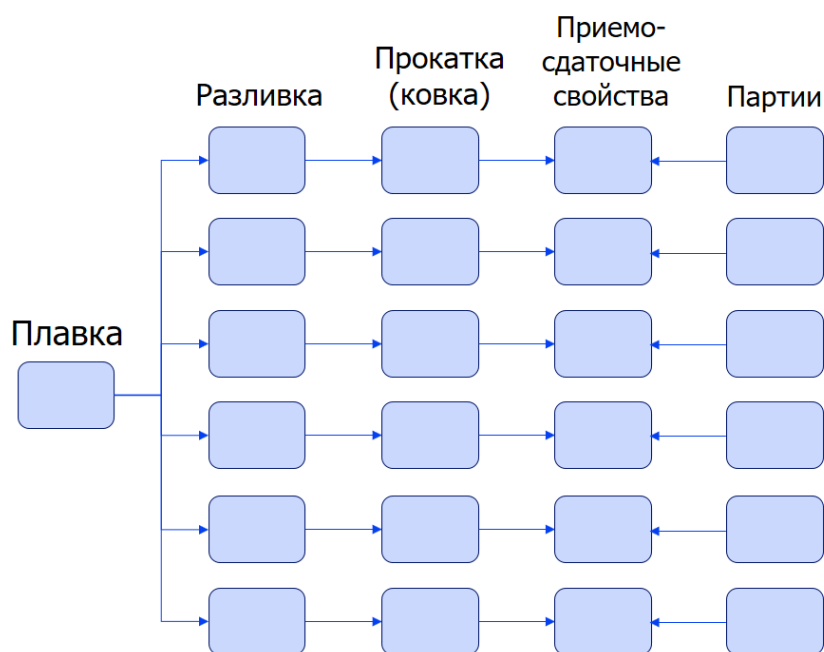


Рисунок 37 - Схема распределения плавки на партии

В таблице 14 показано, сколько партий было изготовлено из одной плавки (в пределах анализируемой базы данных).

Таблица 14 - Возможное распределение партий (по их количеству) в плавке листовой стали 15ХСНД

Толщина листа, мм	Количество партий в одной плавке, ед						Итого	
	1	2	3	4	5	6		
12	60	39	52	30	15	7	кол.	203
	29,6	19,2	25,6	14,8	7,4	3,4	%	100
32	20	8	10	7	3	3	кол.	51
	39,2	15,7	19,6	13,7	5,9	5,9	%	100
Общий итог	80	47	62	37	18	10	кол.	254
	31,5	18,5	24,4	14,6	7,1	3,9	%	100

Такого рода вариация приемо-сдаточных параметров при одинаковых управляющих параметрах затруднит проведение корреляционного и регрессионного анализа для выявления факторов, лимитирующих неоднородность качества металлопродукции. Возможны различные вариации выборок значений:  $x_{\min}$  – выборка минимальных значений из каждой плавки;  $x_{\max}$  - выборка максимальных значений из каждой плавки;  $x_{\text{сред}}$  – выборка средних значений из каждой плавки;  $x_{\text{случ}}$  - выборка случайных значений из каждой плавки;  $x_{\text{общее}}$  - все значения по всем партиям. Коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  для данных выборок варьировались от -0,84 до 1,47 и от -0,82 до 2,44. Также была проведена оценка различия выборок значений предела текучести и ударной вязкости (КСУ<sup>-60</sup>) по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), (таблица 15).

Таблица 15 - Степень различия значений предела текучести и ударной вязкости по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ), в зависимости от типа выборки, сталь 15ХСНД, толщина листа 12мм

Параметр	Тип выборки	Экспериментальные значения критериев/ уровень риска							
		$C_n$				$C_p$			
		$x_{\min}$	$x_{\text{сред}}$	$x_{\text{случ}}$	$x_{\text{общее}}$	$x_{\min}$	$x_{\text{сред}}$	$x_{\text{случ}}$	$x_{\text{общее}}$
$\sigma_{0,2}$	$x_{\max}$	<u>5,14</u> <0,0001	<u>3,11</u> <0,0001	<u>2,67</u> <0,0001	<u>2,98</u> <0,0001	<u>13,62</u> 0,001	<u>7,22</u> 0,001	<u>6,61</u> 0,001	<u>7,98</u> 0,001
	$x_{\min}$	-	<u>3,46</u> <0,0001	<u>2,72</u> <0,0001	<u>3,76</u> <0,0001	-	<u>7,31</u> 0,001	<u>6,32</u> 0,001	<u>8,67</u> 0,001
	$x_{\text{сред}}$	-	-	<u>1,04</u> 0,24	<u>1,51</u> <0,0001	-	-	<u>0,22</u> 0,99	<u>0,22</u> 0,99
	$x_{\text{случ}}$	-	-	-	<u>0,69</u> <u>0,71</u>	-	-	-	<u>0,47</u> 0,70
КСУ <sup>-60</sup>	$x_{\max}$	<u>2,67</u> <0,0001	<u>1,38</u> 0,04	<u>1,19</u> 0,11	<u>1,48</u> <u>0,025</u>	<u>5,81</u> 0,001	<u>2,93</u> 0,001	<u>2,58</u> 0,001	<u>3,06</u> 0,001
	$x_{\min}$	-	<u>1,83</u> 0,003	<u>1,68</u> 0,008	<u>1,80</u> <u>0,003</u>	-	<u>3,06</u> 0,001	<u>3,25</u> 0,001	<u>3,84</u> 0,001
	$x_{\text{сред}}$	-	-	<u>0,45</u> 0,99	<u>0,44</u> <u>0,99</u>	-	-	<u>0,28</u> 0,80	<u>0,36</u> <u>0,80</u>
	$x_{\text{случ}}$	-	-	-	<u>0,41</u> <u>0,99</u>	-	-	-	<u>0,03</u> 0,90

Сопоставление выборок по критериям Стьюдента ( $C_p$ ) и Смирнова ( $C_n$ ) показало, что большинство распределений не принадлежат одной совокупности и значительно отличаются друг от друга. Исключением являются выборки случайных и средних значений. Полученные результаты оказались важны (и были использованы в работе) при оценке влияния химического состава и технологических параметров плавки на вариацию приемо-

сдаточных параметров металлопродукции, в т.ч. на основе корреляционного и регрессионного анализа.

В таблице 16 приведены результаты парного корреляционного анализа между химическим составом и значениями приемо-сдаточных параметров различных выборок.

Таблица 16 - Матрица корреляций приемо-сдаточных свойств и химического состава листа толщиной 12 мм из стали 15ХСНД

Параметр	Выборка из плавки	Управляющие параметры									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	AS
$\sigma_B$	$X_{\min}$	0,30	0,12	0,13	0,05	-0,10	0,05	0,07	0,10	0,09	0,12
	$X_{\max}$	0,27	0,12	0,07	0,12	-0,04	0,04	0,10	-0,06	0,13	0,14
	$X_{\text{сред}}$	0,30	0,16	0,13	0,10	-0,07	0,02	0,08	0,04	0,11	0,13
	$X_{\text{случ}}$	0,30	0,14	0,12	0,06	-0,03	-0,01	0,10	0,04	0,12	0,15
	$X_{\text{общее}}$	0,27	0,21	0,14	0,12	-0,01	-0,03	0,08	0,02	0,08	0,14
$\sigma_{0,2}$	$X_{\min}$	0,08	0,04	0,02	-0,01	0,09	0,01	0,07	0,15	0,11	0,21
	$X_{\max}$	0,16	0,02	-0,03	0,03	0,06	0,06	0,10	-0,02	0,21	0,25
	$X_{\text{сред}}$	0,14	0,03	-0,01	-0,01	0,09	0,03	0,08	0,05	0,21	0,26
	$X_{\text{случ}}$	0,14	-0,02	0,03	-0,02	0,11	-0,07	0,10	0,10	0,21	0,26
	$X_{\text{общее}}$	0,12	0,07	-0,01	0,04	0,09	-0,04	0,06	0,04	0,18	0,25
$\delta$	$X_{\min}$	-0,18	-0,04	0,03	-0,14	-0,27	-0,07	-0,03	-0,08	0,04	0,10
	$X_{\max}$	-0,23	-0,13	-0,13	-0,09	-0,10	0,07	-0,07	-0,18	0,09	0,001
	$X_{\text{сред}}$	-0,23	-0,09	-0,07	-0,14	-0,24	0,00	-0,06	-0,18	0,09	0,04
	$X_{\text{случ}}$	-0,17	-0,02	0,03	-0,17	-0,23	0,05	-0,06	-0,09	0,05	0,03
	$X_{\text{общее}}$	-0,17	-0,11	-0,10	-0,12	-0,16	-0,02	-0,03	-0,11	0,07	0,04
КСУ-60	$X_{\min}$	-0,14	-0,04	0,01	-0,20	-0,56	-0,02	0,08	-0,04	-0,10	0,01
	$X_{\max}$	-0,09	-0,06	0,03	-0,11	-0,50	-0,06	0,10	-0,14	-0,07	0,003
	$X_{\text{сред}}$	-0,13	-0,06	0,02	-0,17	-0,56	-0,05	0,10	-0,09	-0,08	0,001
	$X_{\text{случ}}$	-0,14	-0,01	0,06	-0,17	-0,50	-0,03	0,09	-0,06	-0,08	-0,02
	$X_{\text{общее}}$	-0,18	-0,15	0,03	-0,18	-0,51	-0,05	0,12	-0,08	-0,10	-0,01

Результаты корреляционного анализа показывают, что между химическим составом плавки и приемо-сдаточными параметрами наблюдается достаточно слабая взаимосвязь парный коэффициент корреляции по модулю не превышает 0,56 для всех выборок.

В качестве характеристики прогноза качества металлопродукции широко используется регрессионный анализ. Результаты «наилучшей модели» показывают, что в рамках той же стандартной регрессии выявление такого рода факторов будет затруднено, равно как и оценка их влияния на её результаты. При поиске взаимосвязей между

управляющими и прямо-сдаточными параметрами предполагается, что области существования аргументов зависимость  $y_k$  от параметров процесса единая (рисунок 38–39).

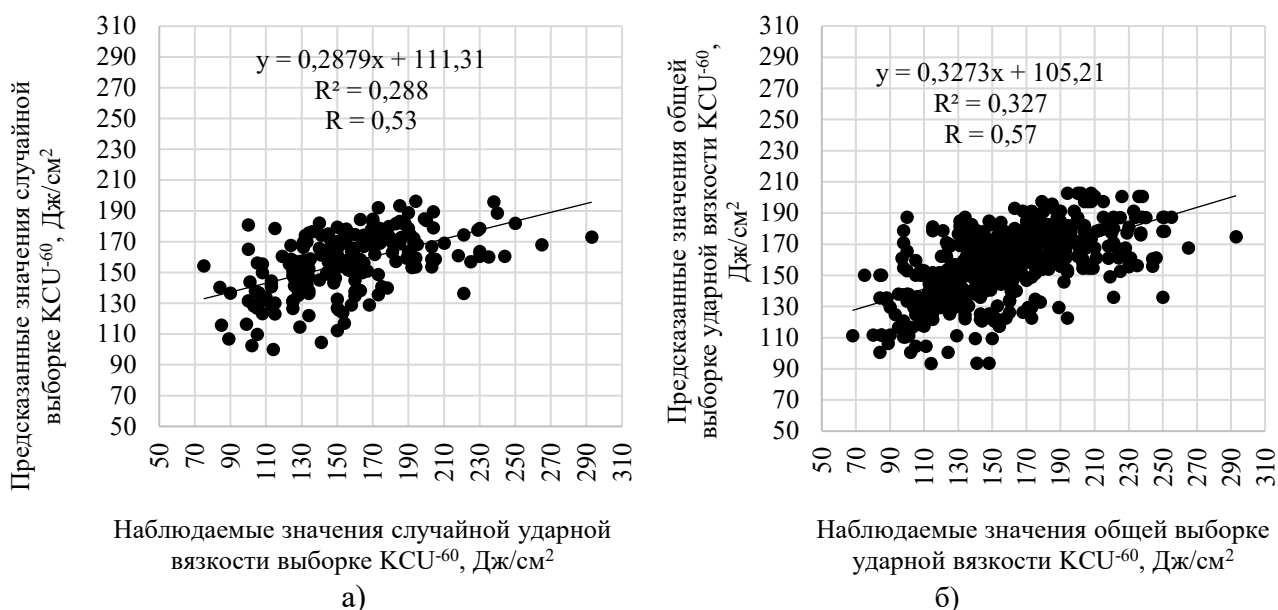


Рисунок 38 - Прогноз ударной вязкости (по результатам анализа химического состава) плавок с использованием множественной регрессии по случайной выборке (а) и по общей выборке (б) сталь 15XСНД

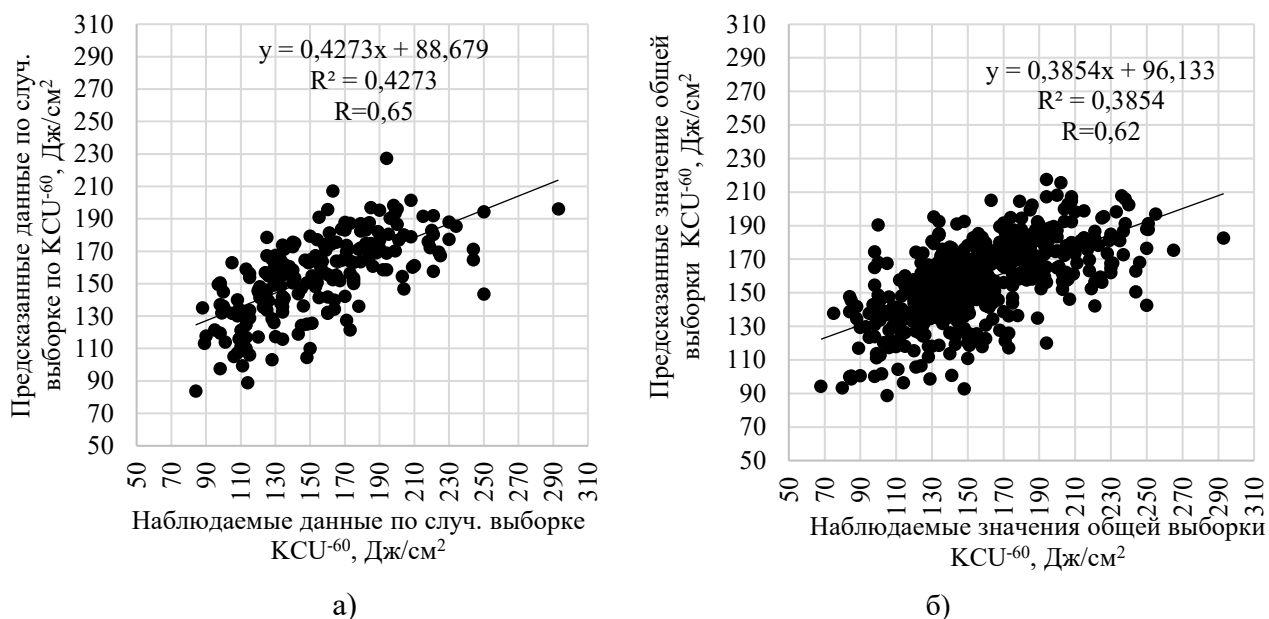
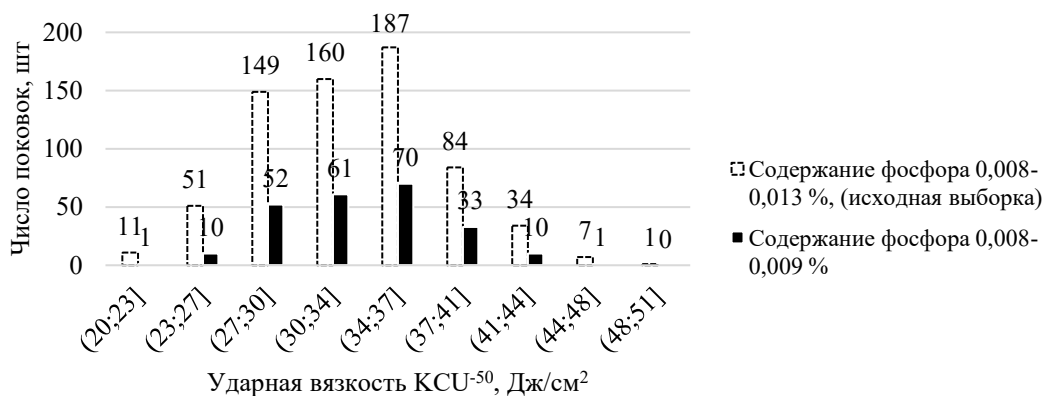


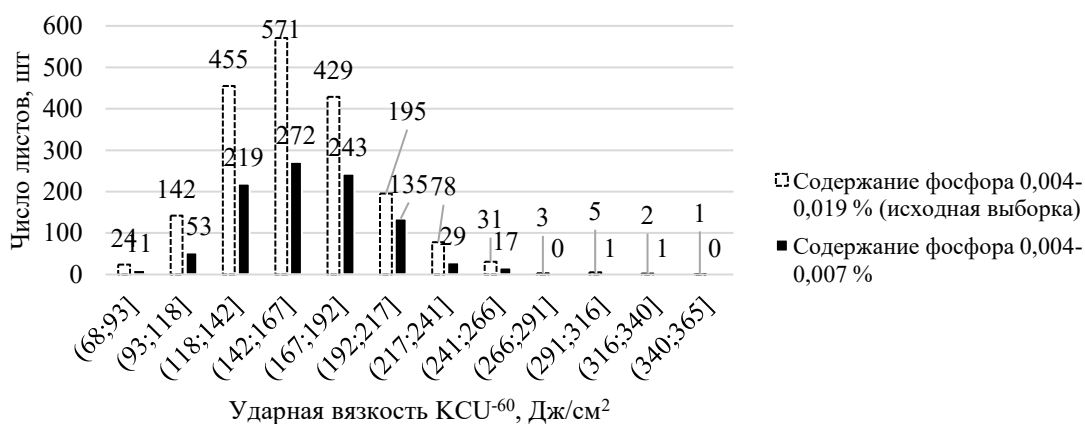
Рисунок 39 - Прогноз ударной вязкости (по результатам анализа управляющих параметров) плавок с использованием множественной регрессии, по случайной выборке (а) и по общей выборке (б) сталь 15XСНД

Низкая результативность регрессионного анализа подтверждается и при попытках применения принципа управления качеством металла «по возмущению», даже в тех случаях, когда оценивается влияние таких «вечнозелёных» факторов качества, как содержание серы и фосфора [19]. В частности, в крупных поковках стали 38XНЗМФА-Ш, стали 40XМФА и листовой стали 15XСНД снижение содержания фосфора (отсечение в

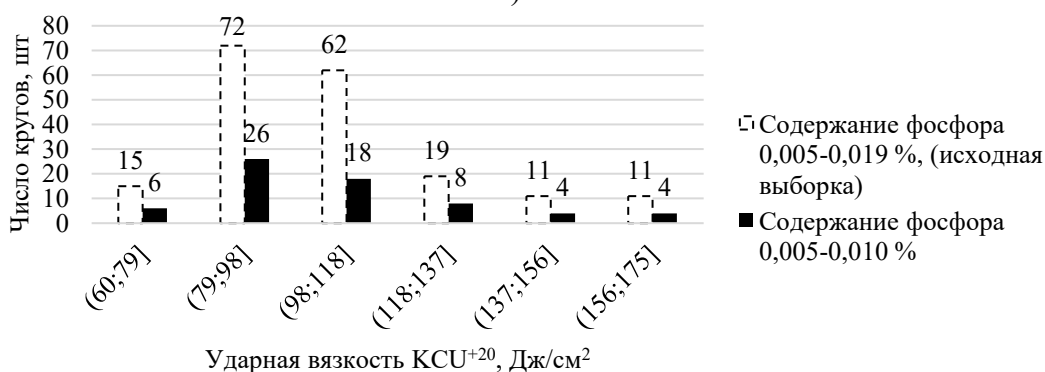
базах данных значений ударной вязкости, отвечающих повышенному содержанию примесей) не привело к смещению вершин гистограмм распределения значений ударной вязкости (средних значений в выборке соответственно) в область более высоких значений. Построение гистограмм сохранило исходный диапазон распределения значений: пропорционально уменьшилось количество партий с минимальными значениями ударной вязкости и «выпало» соответствующее количество партий металла с максимальными их значениями (рисунок 40).



а)



б)



в)

Рисунок 40 - Распределение значений ударной вязкости КСУ из стали 38ХНЗМФА-Ш (а), листа из стали 15ХСНД (б) и стали 40ХМФА (в) и для выборок с исходным и пониженным содержанием фосфора [118]

Учет статистической природы объектов может способствовать оптимизации обучения нейронных сетей и повышению эффективности их функционирования в целом. Такой подход может оказаться также полезным и при использовании активно разрабатываемых алгоритмов нечеткой логики, гибридных применений «мягких вычислений», предполагающих, что установленная неадаптивная функция состояния не всегда позволяет обеспечить необходимую работу системы, а нечеткие правила существенно опираются на опыт эксперта [118].

Важность учета статистической природы объектов в металлургии уже показала свою эффективность при использовании регрессии с целью сужения пространства параметров, применении сложных эвристических приемов когнитивной графики для поиска зон с доминирующим типом зависимости при выявлении взаимодействующих отклонений технологических параметров, относящихся к различным технологическим переделам, использовании схем непараметрической дискриминации, не зависящих от вида распределения (и вследствие этого более робастных) [118].

### **3.5 Определение хладноломкости на основе анализа баз данных производственного контроля с использованием сложных эвристических приемов когнитивных графики**

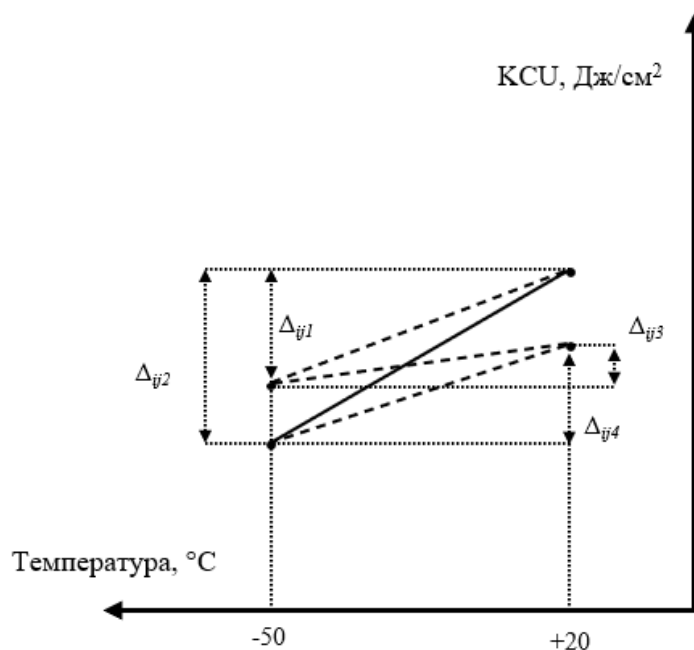
Применения непараметрической статистики представляло интерес оценить, в какой мере возможен прогноз хладноломкости на основе анализа баз данных производственного контроля. Неоднородность вязкости металлопродукции, в частности хладноломкости, отражает разнообразие морфологии номинально однотипных структур, формирующихся вследствие протекания различных сценариев эволюции структур и дефектов в рамках установленного поля допуска технологии. Стандартные процедуры оценки качества массовой металлопродукции не всегда позволяют в полной мере оценить его. Это относится и к хладноломкости, так определение ударной вязкости при пониженных температурах дает косвенный её прогноз – по сопоставлению с некоторым минимальным значением ударной вязкости, соответствующим положению верхней полки серийной ударной кривой. Превышение порогового значения – признак благоприятной хладостойкости, однако при этом вне поля зрения остается такая важная характеристика серийной кривой, как степень снижения ударной вязкости при переходе от высоких к низким температурам испытания.



Её можно оценить в тех случаях, когда регламент предусматривает контроль ударной вязкости металлопродукции при двух температурах испытаниях (комнатной и отрицательной). Для этого может быть полезным ретроспективный анализ баз данных заводского контроля качества массовой металлопродукции, статистика наблюдений которого должна быть достаточной для выявления искомых закономерностей. Однако решение такой задачи связано с развитием соответствующих процедур обработки массивов данных.

Отсюда появился интерес к разработке алгоритмов обработки массивов данных производственного контроля технологии производства крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш для оценки возможности уточнения потенциала её хладостойкости по результатам штатных испытания ударной вязкости (при комнатной и отрицательной температурах) и выявления на этой основе технологических факторов, лимитирующих неоднородность хладостойкости, как в пределах одного изделия, так и от изделия к изделию [135].

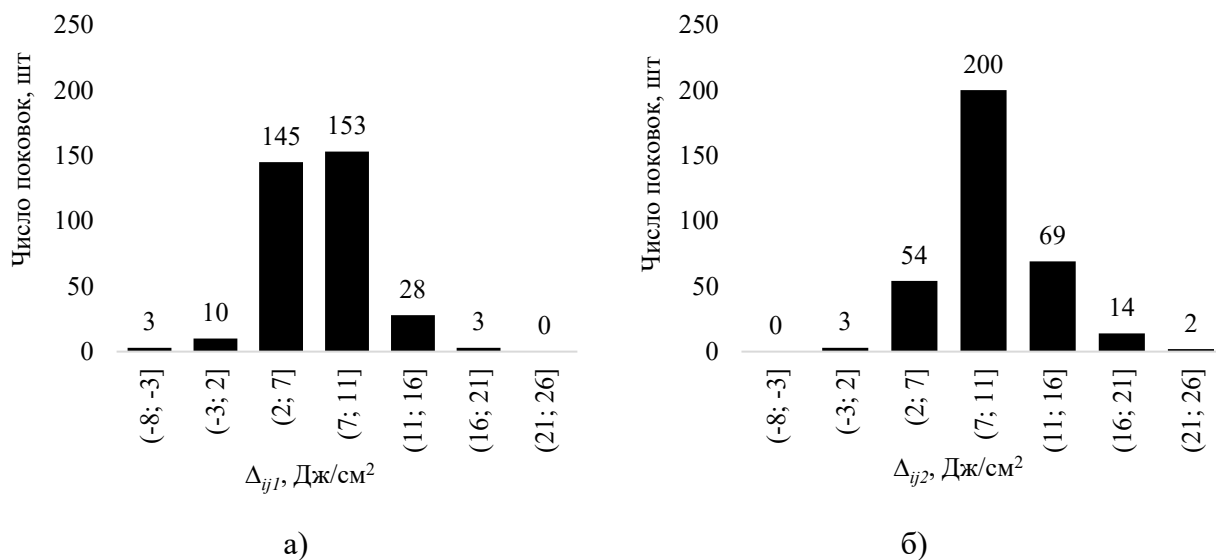
Сохранившаяся, вследствие многообразия сценариев технологической наследственности (в пределах поля допуска технологии) литая структура различного строения, определила в свою очередь, различие в морфологии неметаллических включений (НВ) и микроструктуре стали, как в пределах каждой поковки, так и от поковки к поковке [19]. Это привело к повышенному разбросу ударной вязкости при всех температурах испытания (при этом все значения вязкости соответствовали требованиям нормативных документов) и вырождению вида сериальной кривой – монотонное снижение ударной вязкости наблюдалось во всем интервале температур испытания от +20 до -196 °С. Отсюда различие значений  $\Delta_{ij} = (X_{pi} - X_{nj})$ , где  $X_{pi}$  – значения ударной вязкости при +20, а  $X_{nj}$  – при -50 °С, фиксируемые при штатной аттестации качества поковок, должно прямо характеризовать масштаб неоднородности снижения вязкости, как одного из показателей хладостойкости металла.



- 1)  $\Delta_{ij1} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\max-50})$ ; 2)  $\Delta_{ij2} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$ ;  
 3)  $\Delta_{ij3} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\max-50})$ ; 4)  $\Delta_{ij4} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\min-50})$ ;

Рисунок 41 - Возможные вариации оценки хладостойкости крупных поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш

С учетом разброса значений ударной вязкости при каждой температуре испытания возможны следующие варианты измерения величины  $\Delta$ :  $\Delta_{ij1} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\max-50})$ ;  $\Delta_{ij2} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$ ;  $\Delta_{ij3} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\max-50})$  и  $\Delta_{ij4} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\min-50})$ . По всем четырем различным критериям хладноломкости рассмотрены гистограммы распределения хладноломкости ударной вязкости КСУ (рисунок 42).



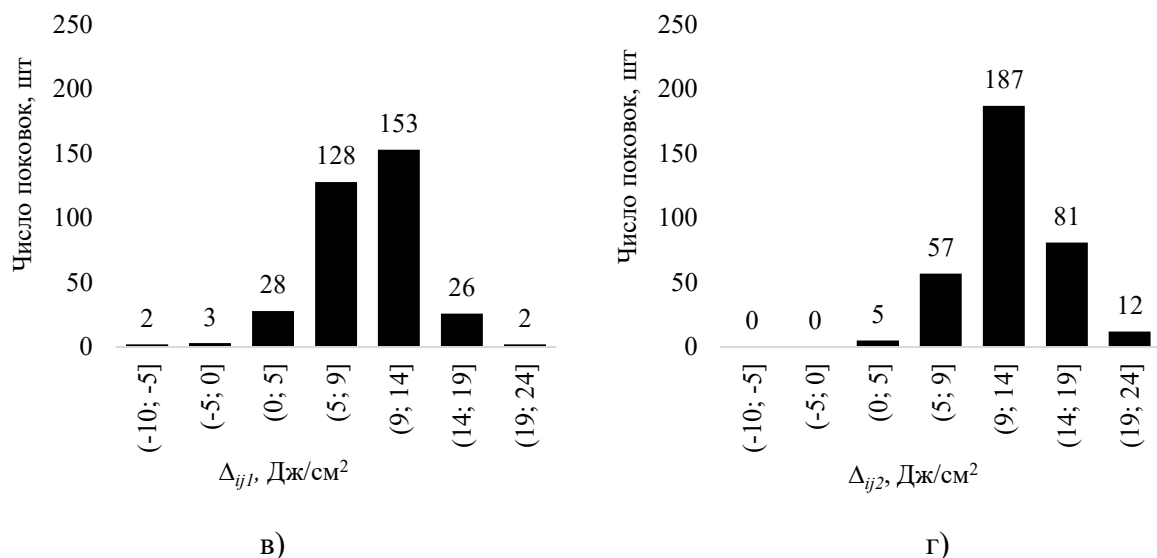


Рисунок 42 - Распределение значений ударной вязкости  $\Delta_{ij1} = ((KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\max-50})$  и  $\Delta_{ij2} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$  из торцевых темплетов с минимальным и максимальным  $D_s$  (а, б) и  $D_l$  (в, г) диаметром из стали 38ХНЗМФА-Ш

Степень информативности каждого варианта определялся на основе гистограмм распределения и статистических характеристик — коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  (таблице 17) [135].

Таблица 17. Статистические характеристики результатов определения показателя хладноломкости  $\Delta_i = (KCU_i^{+20} - KCU_i^{-50})$ , Дж/см<sup>2</sup> [135].

№	Параметр «крутизны»	Диаметр темплета	$\Delta_{ij}$	$(\Delta_{ij})_{\max}$	$A_s$	$E_x$
1	$\Delta_{ij1} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\max-50})$	$D_s$	$7,1 \pm 0,01$	20	0,22	1,63
		$D_l$	$9,5 \pm 0,01$	24	-0,39	1,76
2	$\Delta_{ij2} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$	$D_s$	$9,7 \pm 0,01$	26	0,87	2,45
		$D_l$	$12,6 \pm 0,01$	24	0,09	0,63
3	$\Delta_{ij3} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\max-50})$	$D_s$	$5 \pm 0,01$	16	-0,07	1,21
		$D_l$	$7,3 \pm 0,01$	17	-0,76	1,60
4	$\Delta_{ij4} = (KCU_i^{\min+20} - KCU_j^{\min-50})$	$D_s$	$7,6 \pm 0,01$	20	0,53	0,94
		$D_l$	$10,4 \pm 0,01$	21	-0,34	0,70

Примечания: 1. « $\Delta_{ij}$ » — среднее значение по выборке  $\{\Delta_{ij}\}$ . 2.  $(\Delta_{ij})_{\min} = 0$  для всех четырех вариантов ее определения. 3. Стандартная ошибка определения коэффициента асимметрии  $A_s$  — 0,39, коэффициента эксцесса  $E_x$  — 1,30.

Полученные результаты (гистограммы распределения значения параметра  $\Delta_{ij}$ , величины коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ ) вытекает разнообразие видов распределения исследуемых вариантов выборок величины  $\Delta_{ij}$  [135].

Наряду с этим получены единичные «аномальные» результаты: например, более высокая ударная вязкость при отрицательной температуре по сравнению с ударной вязкостью при комнатной температуре. Взаимосвязь значений ударной вязкости  $X_{pi}$  и  $X_{nj}$  характеризуют данные для  $KCU_{\max i}^{+20}$  и  $KCU_{\min j}^{-50}$ , приведенные в качестве примера на рисунке 43 [135].

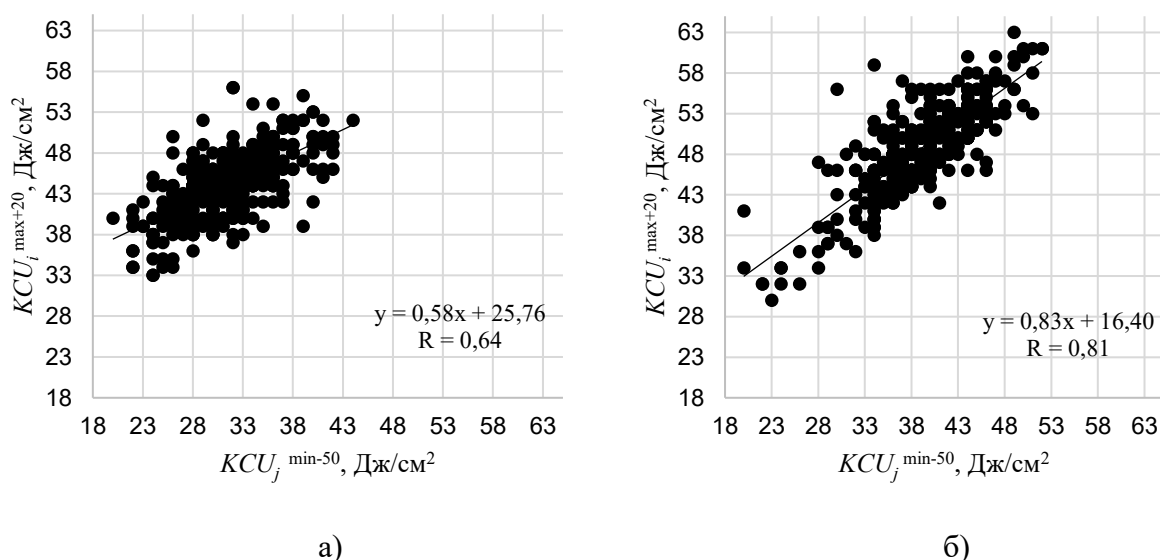


Рисунок 43 - Соотношение между значениями ударной вязкости, полученной при испытаниях образцов при +20 ( $KCU_i^{\max+20}$ ) и - 50 °C ( $KCU_j^{\min-50}$ ), вырезанных из торцевых темплетов поковки диаметром  $D_l$  (а) и  $D_s$  (б) [135]

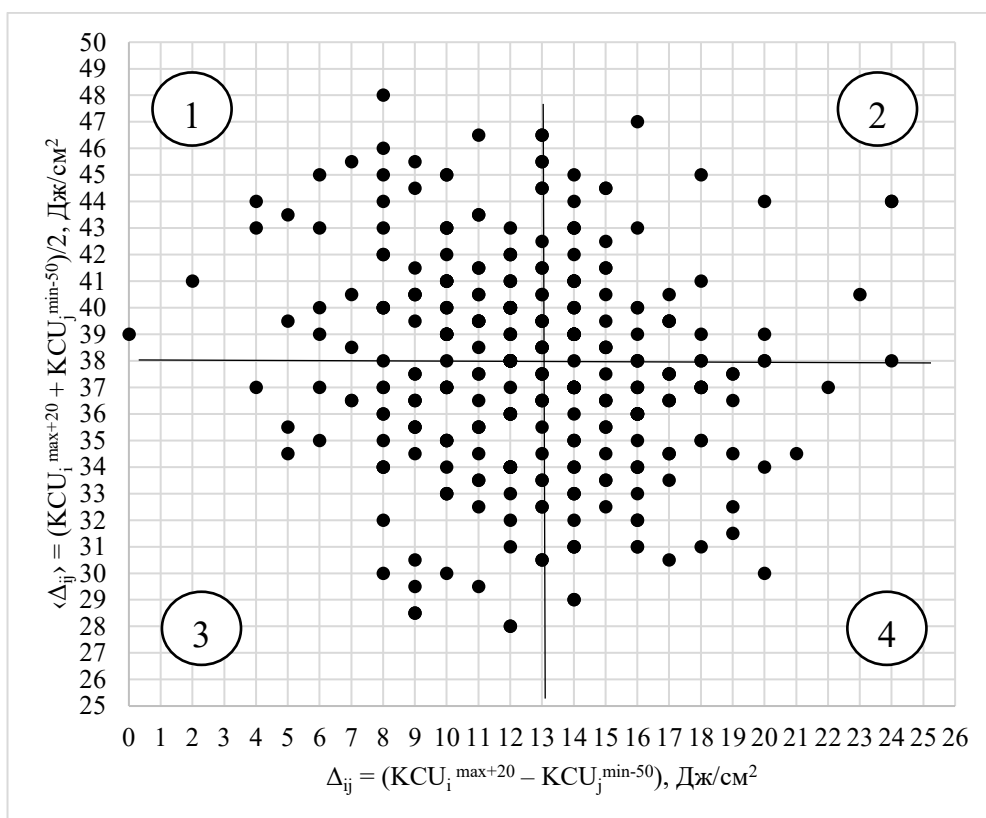
Согласно им, взаимосвязь величин менее выражена для образцов, вырезанных из торцевых темплетов большего диаметра (это справедливо для составляющих  $\{X_{pi}\}$  и  $\{X_{nj}\}$  всех остальных вариантов выборок  $\{\Delta_{ij}\}$ ): для них  $R = 0,57—0,65$ , а для темплетов меньшего диаметра  $R = 0,81—0,83$ . Такое различие может быть связано с большей неоднородностью разнородных структур, обусловленной развитыми процессами ликвации [135].

Наибольший диапазон вариации значений  $\Delta_{ij}$  наблюдался в паре  $\{KCU_{\max i}^{+20}$  и  $KCU_{\min j}^{-50}\}$ , что определило ее выбор для оценки «крутизны» снижения ударной вязкости. Очевидно, что с точки зрения «потери» ударной вязкости с понижением температуры испытания предпочтение в хладостойкости следует отдать тем поковкам, где «крутизна её снижения» будет меньше. А при равных значениях «крутизны снижения» преимущество в хладостойкости будет у поковок с повышенным уровнем абсолютных значений ударной вязкости [135].

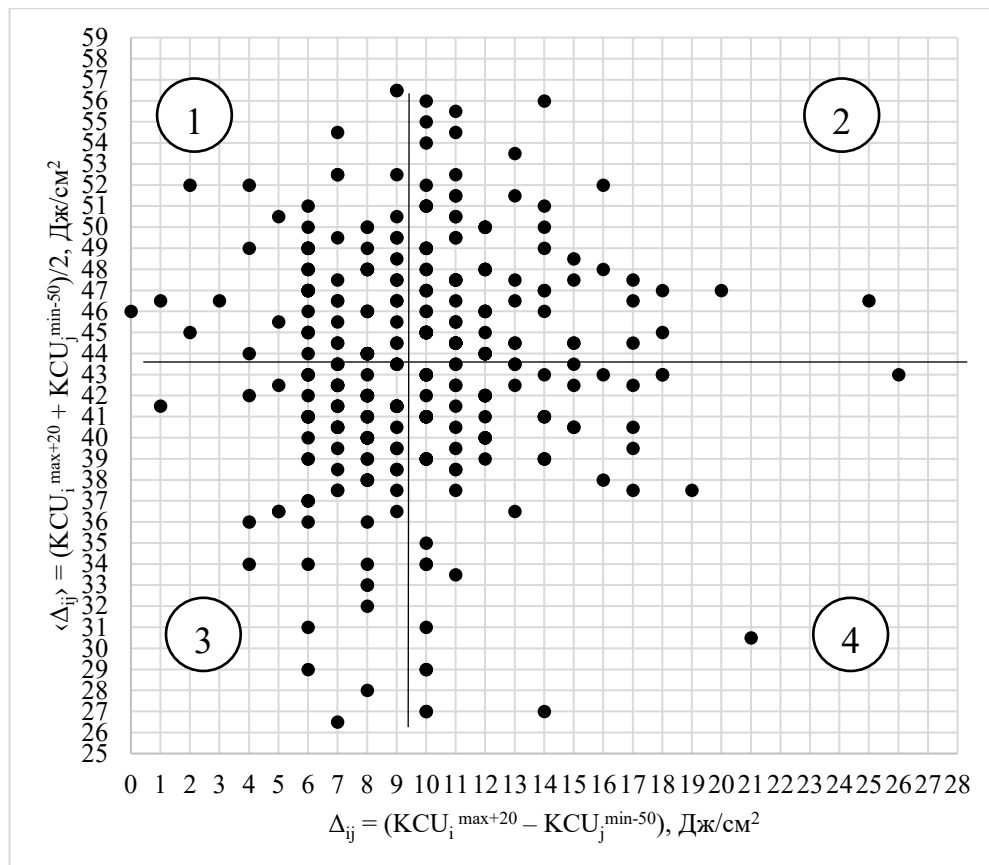
С учетом этого было предложено классифицировать хладостойкость исследуемых поковок по степени крутизны снижения ударной вязкости  $\Delta_{ij} = (KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$  и среднему уровню их значений  $\langle \Delta_{ij} \rangle = (KCU_i^{\max+20} + KCU_j^{\min-50})/2$ . Для этого облако значений 342 точек на плоскости в системе координат  $\Delta_{ij}$  и  $\langle \Delta_{ij} \rangle$  было разбито на четыре области

прямыми соответствующими их средним арифметическим значениям по выборкам (диаграмма хладостойкости) (рисунок 44) [135].

Каждая из зон характеризуется определенным уровнем хладостойкости. Зона 1 — зона высокой хладостойкости, в нее попали поковки с высоким средним значением ударной вязкости  $\bar{x}_{ij}$  и малой «крутизной» ее снижения  $\Delta_{ij}$  при изменении температуры испытаний от  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\{\bar{x}_{ij}\} > \langle \bar{x}_{ij1} \rangle$  и  $\{\Delta_{ij1}\} < \langle \Delta_{ij} \rangle$ . В зоне 2 оказались поковки с приемлемой хладостойкостью — высоким средним значением ударной вязкости и большой «крутизной» ее снижения:  $\{\bar{x}_{ij2}\} > \langle \bar{x}_{ij} \rangle$  и  $\{\Delta_{ij2}\} > \langle \Delta_{ij} \rangle$ . Зону 3 составили поковки с удовлетворительной хладостойкостью — низким средним значением ударной вязкости и небольшим ее изменением со снижением температуры испытаний:  $\{\bar{x}_{ij3}\} < \langle \bar{x}_{ij} \rangle$  и  $\{\Delta_{ij3}\} < \langle \Delta_{ij} \rangle$ . И, наконец, в зону 4 — зону неудовлетворительной хладостойкости — попали поковки с низким средним значением ударной вязкости и большой «крутизной» ее снижения:  $\{\bar{x}_{ij4}\} < \langle \bar{x}_{ij} \rangle$  и  $\{\Delta_{ij4}\} > \langle \Delta_{ij} \rangle$  [135].



а)

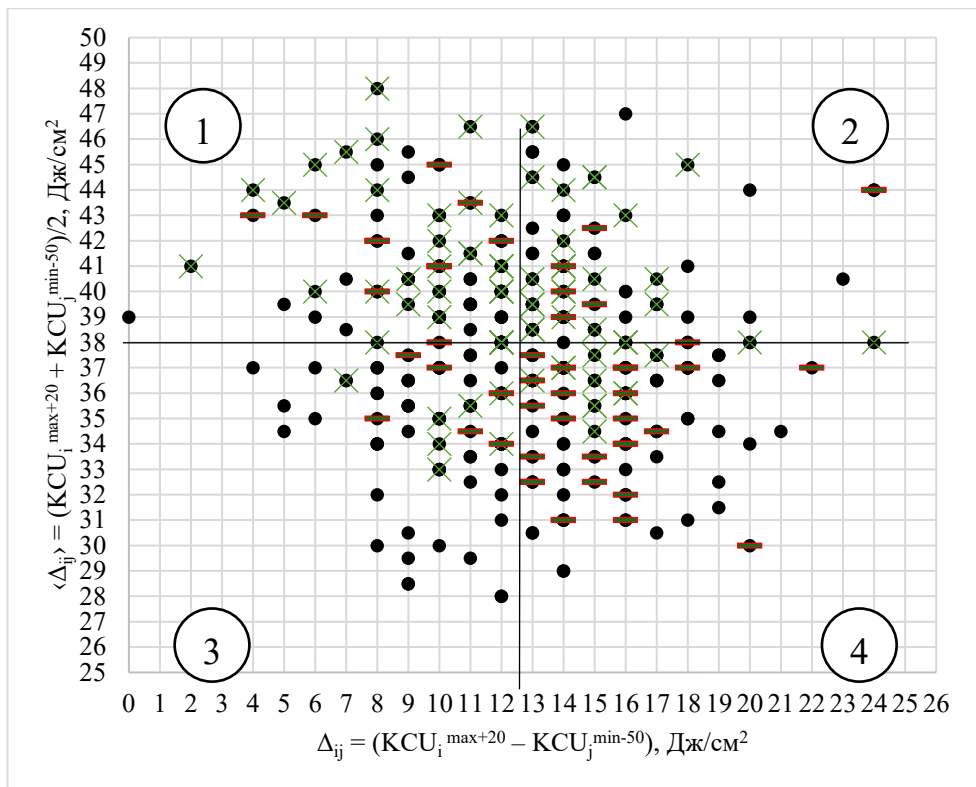


б)

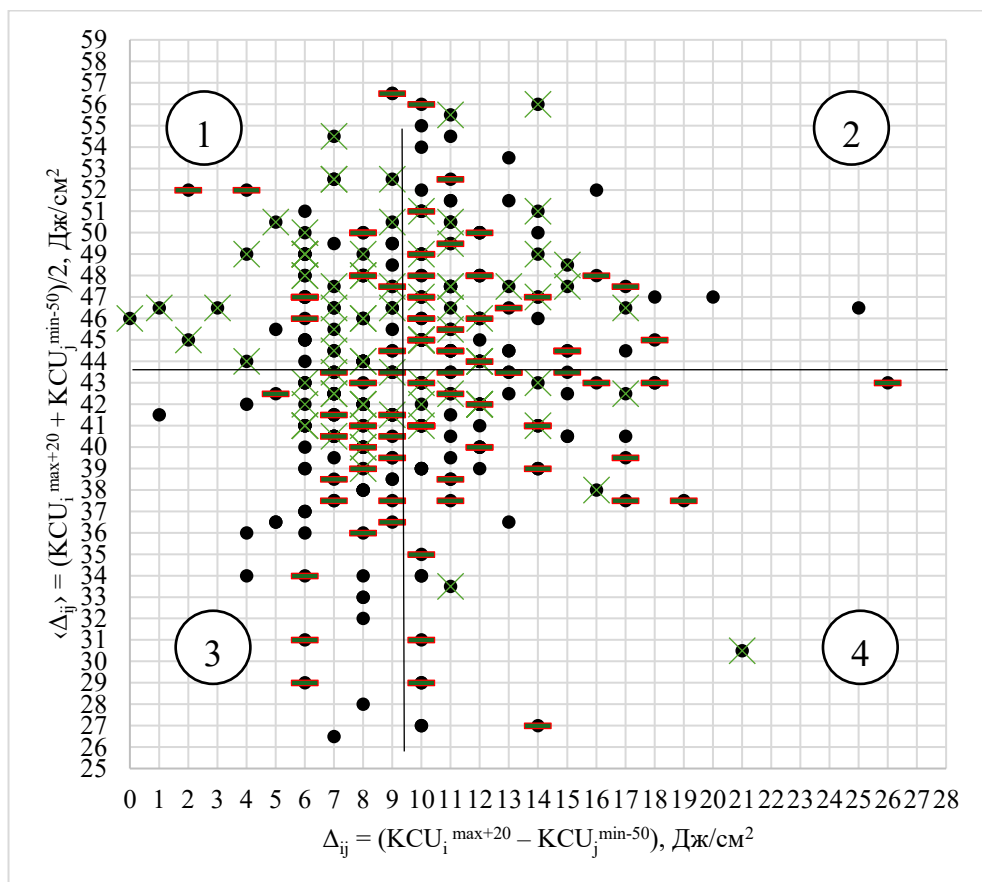
Рисунок 44 - Диаграмма хладостойкости — разделение поковок по уровню хладостойкости на четыре класса по соотношению параметров  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  и  $\bar{x}_{ij} = (KCU_{\max i}^{+20} + KCU_{\min j}^{-50}) / 2$  для образцов, вырезанных из торцевых темплетов диаметрами  $D_l$  (а) и  $D_s$  (б) [135].

Предложенная схема ранжирования поковок по хладноломкости имеет смысл не только для более полной аттестации их качества, но для оценки возможных причин наблюдаемого различия. Очевидно, что наиболее сильное влияние структурных и технологических факторов, определяющих неоднородность хладноломкости, должно проявиться в предельных случаях, для максимально высокого и низкого уровней вязкости (области «1» и «4») на образцах, вырезанных из противоположных торцевых темплетов (с учетом потенциальных различий в ликвации и дальних её последствиях по сечению и высоте слитка [1,136]), [135].

Проведено сопоставление значений торцевых темплетов с максимальным  $D_l$  и минимальным  $D_s$  диаметром, части поковок высокого и низкого уровней вязкости (области «1» и «4») на образцах, для определения абсолютных совпадений между высоким и низким уровнями вязкости (области «1» и «4») на образцах стали 38ХН2МФА-Ш (рисунок 45).



а)



б)

Рисунок 45 - Диаграмма сопоставления хладостойкости вырезанных из торцевых темплетов диаметрами  $D_l$  (а) и  $D_s$  (б) между собой [135]

Ниже представлена таблица распределение количества поковок по четырем зонам, (таблица 18).

Таблица 18 - Распределение значений максимальной  $D_l$  и минимальности  $D_s$  части на пространстве параметров хладноломкости  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  стали 38ХНЗМФА-III [135]

	Зона I $D_l$	Зона II $D_l$	Зона III $D_l$	Зона IV $D_l$	Итого
Зона I $D_s$	34	30	19	12	<b>95</b>
Зона II $D_s$	23	27	11	7	<b>68</b>
Зона III $D_s$	8	14	54	12	<b>88</b>
Зона IV $D_s$	15	28	28	20	<b>91</b>
<b>Итого</b>	<b>80</b>	<b>99</b>	<b>112</b>	<b>51</b>	<b>342</b>

Следует отметить, что высокая и низкая хладостойкость в толстой и тонкой частях поковок, было в размере 95 и 80; 91 и 51 штук, одновременно наблюдалась в 35,7 и 45,3; 22,0 и 39,2 % случаях соответственно. В этом, по-видимому, нет противоречий, причина – в различной степени проработки литой структуры (верх и низ слитка), а отсюда, с учетом многообразия сценариев технологической наследственности в рамках поля допуска технологии, и отличия в размещении НВ и строении микроструктур [1,135].

Часть поковок с высокой и низкой хладостойкостью локализовалась в близлежащих областях (классах) хладостойкости: для толстой части поковки в зонах II и III их тонкой части – 31,6 и 30,8 % соответственно и аналогично в толстой части 28,8 и 23,5 % соответственно [135]. Суммарная доля совпадений (в предельных и ближних классах хладостойкости) в толстой и тонкой частях поковок была достаточно велика - до 75%. При этом наблюдались и прямо противоположные результаты: наличие в одних и тех же поковках признаков высокой и неудовлетворительной хладостойкости в их толстой и тонкой частях - 15,6 и 18,8; 22 и 23,5 соответственно [135]. Это указывает на то, что протекание технологической наследственности может различаться также и в рамках отдельной траектории технологического процесса с учетом отличий в степени проработки литой структуры по длине поковки [135].

Рассмотрим распределение поковок всех четырех зон по плавкам, для выявления только положительных плавков. В базе данных стали 38ХНЗМФА-III имеется 40 плавков в которых расположены 342 поковки (рисунок 46).



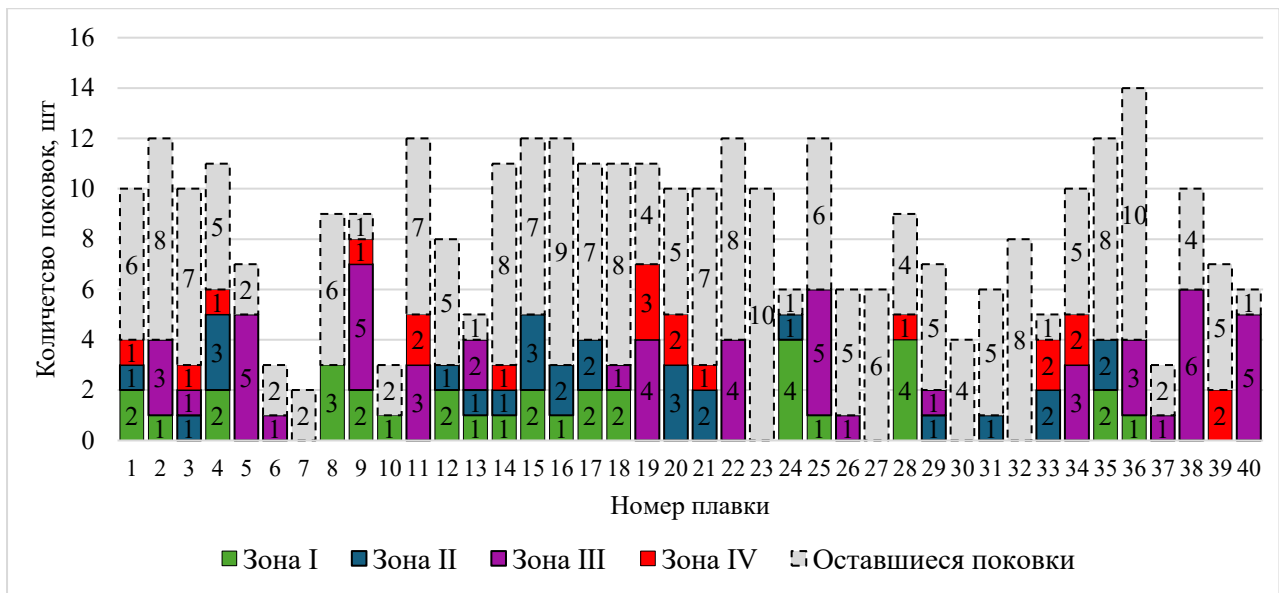


Рисунок 46 - Распределения совпадений хладноломкости  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  зоны 1 - зоны 4 значений между максимальной  $D_l$  и минимальности  $D_s$  части по мартеновских плавках стали 38ХНЗМФА-Ш.

Построение гистограмм показало, что в одной мартеновской плавке могут быть отличные и плохие поковки, чтобы увеличить нахождение критических областей к оценке хладноломкости  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  для выявления причин неоднородность качества металлопродукции по управляющим и сдаточным параметрам, рассмотрим соотношение торцевых темплетов диаметрами  $D_l$  и  $D_s$ , по хладноломкости  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  и  $\bar{x}_{ij} = (KCU_{\max i}^{+20} + KCU_{\min j}^{-50}) / 2$ , без учета граничных и приграничных поковок (по отношению к границе раздела поковок по их склонности к хладноломкости).

При рассмотрении были исключены те поковки, чьи значения величин  $\Delta_{ij}$  и  $\langle \Delta_{ij} \rangle$  попали на границы раздела и в приграничные области (ближние ряды экспериментальных точек, прилегающие к границам) всех четырех зон диаграммы хладостойкости. В результате такого отбора в зонах 1 и 4 осталось 35 и 18; 26 и 16 для темплетов диаметром  $D_l$  и  $D_s$  соответственно. Из них только в 22 поковках наблюдалось совпадение уровня хладостойкости металла на двух её торцевых темплетах. Отсутствие полного совпадения не является чем-то неожиданным для такого вида металлопродукции, где обычно велико различие в морфологии разнородных структур от образца к образцу при их вырезке в пределах одного темплета [19]. Тем более, есть все основания ожидать подобного эффекта по длине поковки с учетом дополнительных ликвационных эффектов и их дальнейших последствий, связанных с различием состава и уровня чистоты металла по примесям, как правило, наблюдаемым по высоте слитка, а также с учетом переменного сечения поковки.

Следует также принять во внимание многообразие траекторий технологического процесса - набор  $K$  фактических значений параметров  $\{\xi_{kn}\}$  для данной партии  $n$  (траекторией  $n$  в пространстве параметров  $\{\xi_k\}$ ). Каждая траектория приводит к своему набору показателей качества  $\{y_{in}\}$ , однако при этом возможны отличия в отклике металла с различной «наследственностью» на идентичные технологические воздействия, и как результат, к вариации показателей качества в пределах одного изделия.

Очевидно, что, когда значения управляющих параметров  $\{\xi_k\}$  будут находиться на верхнем и нижнем диапазонах их изменения (в пределах поля допуска технологии соответственно) их влияние на структуру должно сказаться в наибольшей степени. Исходя из этого, а также с учетом возможного их воздействия на хладостойкость, диапазоны изменения параметров, тех, у которых распределение было близко к нормальному (точнее симметричному), были разбиты на четыре равных интервала. В зависимости от знака их влияния на искомое свойство (с учетом имеющихся в литературе представлений) им были присвоены баллы: 1, 2, 3, 4 (или 4, 3, 2, 1). Для тех параметров состава и технологии, распределение значений которых отличалось от симметричного, например, серы, фосфора, молибдена и ванадия (коэффициенты асимметрии и эксцесса 0,93 и 1,37; 0,67 и 0,62; -0,14 и 3,66; 0,27 и -0,83 соответственно) [135]. Сначала проводилось разбиение диапазона их изменений на два – по среднему их значению, а далее каждый из них разбивался на два одинаковых интервала. Ранжировка по четырех балльной шкале проводилась также, как и для остальных параметров [135].

В предположении аддитивного характера их влияния на хладостойкость проводилось суммирование всех баллов по каждой поковке, после чего определялась средняя сумма баллов, приходящаяся на поковки в зонах 1 и 4:  $\langle P_1 \rangle$  и  $\langle P_4 \rangle$  соответственно. Применение такой процедуры для оценки влияния химического состава на хладостойкость (в зонах 1 и 4) выявило значимое различие средних баллов ( $\langle P_1 \rangle = 26,5$  и  $\langle P_4 \rangle = 25,2$ ) в темплетях диаметром  $D_l$  – по критерию Стьюдента  $t_{\text{эксп}} = 2,15 > t_{\text{табл}}^{0,05} = 2,10$  и отсутствие различий в темплетях диаметром  $D_s$  ( $\langle P_1 \rangle = \langle P_4 \rangle = 26,0$ ) [135]. Такой результат отражает более интенсивное развитие ликвации в больших сечениях и косвенно подтверждает аддитивный характер влияния на хладостойкость общеизвестных факторов, в частности, таких, как отрицательное влияние повышенного содержания фосфора, или положительное – молибдена [135, 137, 138]. Однако, для более глубокого понимания роли химического состава и других технологических параметров в формировании уровня хладостойкости, данного подхода может оказаться недостаточно, в т. ч. для выработки обоснованных технологических решений, направленных на повышение её уровня. Одна из причин этому,

например, в том, что одной и той же сумме баллов для различных поковок может соответствовать свой набор её составляющих (таблица 19) [135].

Таблица 19 - Балльная оценка влияния содержаний элементов в стали после ЭШП на ударную вязкость для поковок с высоким уровнем хладостойкости [135].

№ поковки	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Сумма баллов $P_1$
1	3	3	3	2	3	3	3	2	2	4	28
2	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	29
3	3	4	2	3	3	2	3	3	3	3	29
4	3	4	3	3	2	3	3	2	3	3	29
5	3	4	4	3	2	2	2	3	2	3	28
6	3	4	3	3	2	3	2	4	2	2	28
7	3	3	3	2	3	2	4	3	3	3	29

П р и м е ч а н и е. В таблице приведены данные для части темплетов диаметром  $D_l$  поковок различных мартеновских плавок, входящих в зону 1 (см. рис. 41) и состоящих в двух подгруппах с идентичными значениями суммы баллов  $P_1$ .

Очевидно, что при включении в таблицу дополнительных столбцов: параметры выплавки в мартене, обработки в ковше синтетическим шлаком, ЭШП,ковки, термической обработки неизбежно приведет к еще большему многообразию сочетаний слагаемых для идентичных сумм баллов [135].

Технологическая цепочка производства поковок, как и любых материалов в принципе, в сочетании с нормативным полем допуска технологии определяет возможные сценарии эволюции структуры и дефектов от выплавки до конечной термической обработки. Отсюда, как правило, достижение высокого качества металлопродукции не является следствием предпринятых усилий на одном из этапов технологии, а требует взаимного согласования управленческих решений по всей технологической цепочке. Например, в рамках рассматриваемой технологии производства поковок, могли наблюдаться различные варианты неоднородности хладостойкости с привязкой поковок к первичной мартеновской плавке (таблица 20) [135].

Таблица 20 - Распределение уровня хладостойкости поковок в пределах отдельных плавков [135].

Плавка	Номер поковки	Зона				Приграничная область								Граница			
		1	2	3	4	1-2	1-3	2-1	2-4	3-1	3-4	4-2	4-3	1:02	1:03	2:04	3:04
1	1																
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																
2	1																
	2																
	3																
	4																
	5																
	6																
	7																

Примечание. Первая цифра в обозначении приграничных областей — зона, в которой расположена приграничная область, вторая — смежная с ней зона (см. рисунок 45).

Поскольку возможность наследования свойств металла, сформированных в ходе мартеновской плавки, зависит от вида дальнейших траекторий технологического процесса в пределах его поля допуска, то при их совпадении (или достаточно близком характере) можно ожидать проявления однотипных механизмов эволюции структур и дефектов и формирования, однородных по своему набору показателей качества  $\{y_{in}\}$ . Однако с учетом наблюдаемой вариации уровня хладостойкости металла, как, например, в плавке 1 (см. таблицу 20) рискованно предполагать, что для последующих аналогичных плавков не были предприняты попытки повысить её уровень проведением коррекции технологии в пределах нормативного поля технологии [135].

Успех таких коррекционных воздействий обычно сложно оценить, опираясь на прогнозные возможности аппаратов корреляционного и регрессионного анализа. Действительно, оценка коэффициентов корреляции в парах: параметры технологии, включая химический состав стали (после ЭШП) и крутизна её снижения в интервале температур испытания  $+20 \dots -50$  °С, а также соответствующие значения ударной вязкости не выявила сколь-либо значимых эффектов (таблица 21).

Таблица 21 - Коэффициенты корреляции между параметрами технологии (в пределах поля допуска), ударной вязкостью при температурах +20 °С и –50 °С и «крутизной» ее «снижения»  $\Delta_{ij}$  [135]

Параметр технологии		Темплет поковки диаметром					
		$D_s$			$D_l$		
		$KCU_i^{\max+20}$	$KCU_j^{\min-50}$	$\Delta_{ij}=(KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$	$KCU_i^{\max+20}$	$KCU_j^{\min-50}$	$\Delta_{ij}=(KCU_i^{\max+20} - KCU_j^{\min-50})$
Химический состав стали после ЭШП:	C	-0,42	-0,39	-0,06	-0,31	-0,26	-0,03
	Mn	-0,17	-0,18	0,02	-0,10	-0,08	-0,02
	Cr	-0,38	-0,35	-0,05	-0,11	-0,08	-0,02
	Ni	0,34	0,24	0,17	0,35	0,20	0,16
	Si	-0,26	-0,33	0,10	-0,24	-0,26	0,05
	V	-0,08	-0,08	0,01	0,08	-0,06	0,16
	Mo	0,03	0,01	0,03	0,06	0,004	0,06
	S	-0,41	-0,29	-0,20	-0,12	0,04	-0,19
	P	-0,25	-0,21	-0,07	-0,20	-0,12	-0,07
Максимальная температура нагрева слитка под ковку		-0,15	-0,16	0,02	-0,03	-0,09	0,08
Температура началаковки		0,23	0,12	0,19	0,21	0,16	0,04
Температура второго отпуска		0,04	0,04	-0,01	0,08	0,06	0,01

Как показывает практика [139], аналогичные результаты дает применения регрессии. Причина низкой эффективности классической статистики в отсутствии нормального распределения значений параметров технологии и состава  $\xi_k$ . Этому препятствуют ограничения их изменений в рамках технологии нормативными пределами варьирования  $\{\xi_k^{\min}, \xi_k^{\max}\}$ , а также целенаправленное воздействие на ряд параметров в ходе процесса с целью обеспечения приемлемого их уровня (значений), например, для минимизации содержания серы и фосфора в сталях [135].

Отсюда существующее разнообразие отклонений (и их масштаба) вида распределения значений управляющих параметров от симметричного, что подтверждает уровень вариации соответствующих значений коэффициентов и эксцесса. В частности, для таких параметровковки слитков ЭШП, как время прогрева заготовки перед ковкой, максимальная температура её нагрева перед выходом из печи, температура начала и концаковки, соответствующие значения коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$  составили 3,36 и 11,95; 1,92 и 3,81; -1,02 и 1,53; 0,08 и -0,65 [135]. Применение регрессии также предполагает, что во всей области существования аргументов зависимость свойств  $y_i(\xi)$  единая. Однако

пространство параметров технологии в действительности разбито на ряд областей с доминирующим типом зависимости, границы которых необходимо найти, прежде чем определять возможные типы существующих зависимостей («входные – выходные параметры»), особенности их взаимодействия друг с другом.

### 3.6 Развитие приемов когнитивной графики для выявления областей с доминирующим типом зависимостей

Когнитивная графика — это совокупность приемов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения.

Применение когнитивной графики в металлургии в ряде случаев дает наглядное представление о характере взаимосвязи между технологическими параметрами и свойствами, позволяя найти области с доминирующим типом зависимости. Перед построением когнитивных графиков для выявления областей с доминирующим типом зависимости, первоначально нужно провести анализ гистограмм распределения. Где будет проходить анализ наилучших значений и наихудших значений технологического параметра. На рисунке 47 показаны красным цветом наихудшие, зеленым цветом представлены наилучшие значения ударной вязкости ( $KCU^{+20}$ ), в размере 10% на каждую сторону от общего количества.

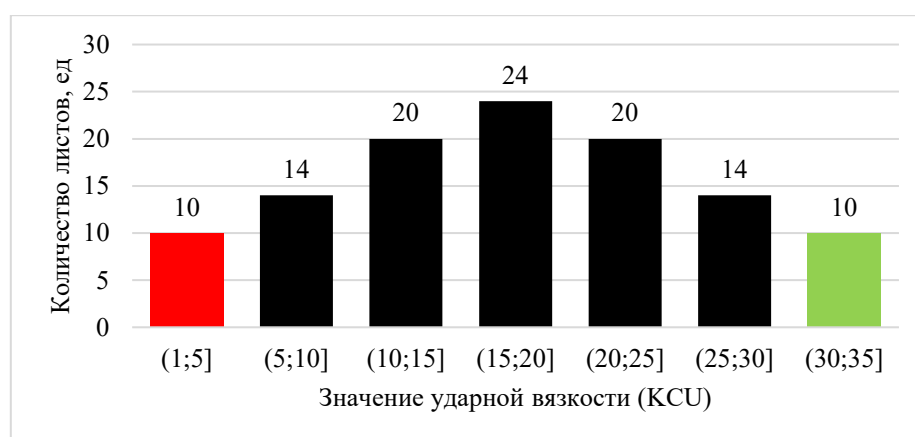


Рисунок 47 - Распределения значений ударной вязкости (KCU) стали

Так для поиска областей с доминирующим типом зависимости эффективны приемы когнитивной графики, в частности, один из простейших приемов: двумерное отображение областей существования объектов в виде "облака точек" на разных плоскостях пар параметров  $x_i - x_m$ , влияние которых на искомое свойство, либо подтверждено

предшествующей практикой исследований, либо на это указывают косвенные признаки, гипотезы, основанные на имеющихся в научно-технической литературе сведениях по данному вопросу [ 19,140,141].

В стали 13Г1С-У двумерное отражение областей существования объектов выявило зоны риска совместного содержания серы и фосфора, определяющие значения ударной вязкости КСУ<sup>-40</sup> в интервале от 65 до 110 Дж/см<sup>2</sup> (на нижнем пределе распределения) (рисунок 48) [139].

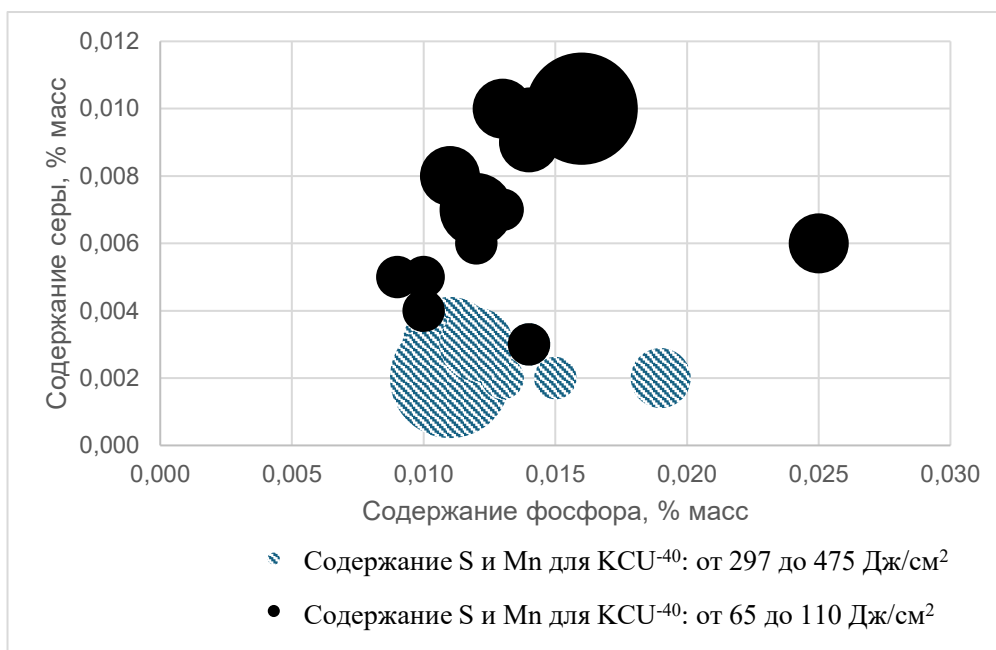
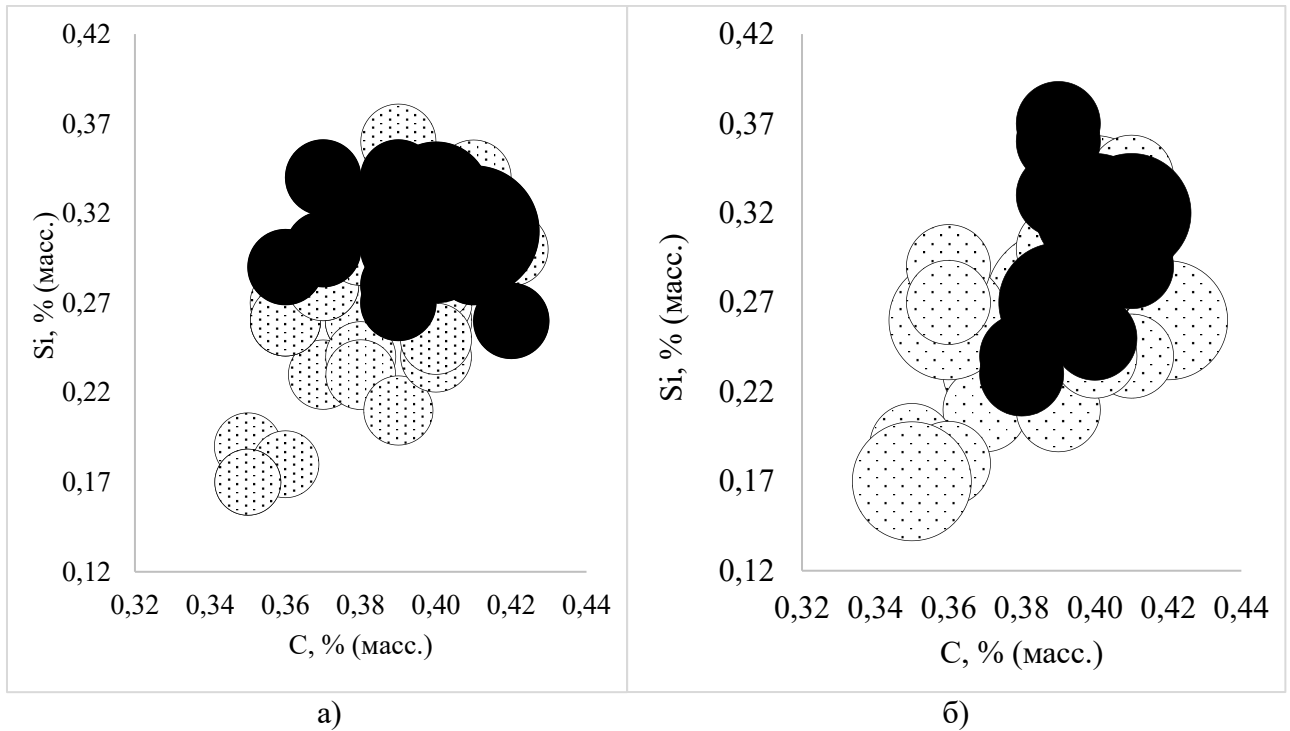


Рисунок 48 - Выделение областей с доминирующим типом зависимости (совместное влияние содержания серы и фосфора), приводящих к появлению ударной вязкости на нижнем и верхнем пределах распределения значений ударной вязкости КСУ<sup>-40</sup>, сталь 13Г1С-У, лист толщиной 10 мм, Nb ≤ 0,030 %, масс.

Однако из приведенных результатов следует, что попадание в зону риска по сере и фосфору не всегда приводит к отрицательному результату, равно как и их попадание в благоприятную зону – исключает провалы по ударной вязкости. Не исключено, что иные факторы технологии могут как нейтрализовать, так и усилить отрицательные возмущения такого рода. Очевидно, что такой подход невозможен без необходимого понимания объекта исследования, знания «скрытых переменных, что существенно при переходе от рассмотрения связей «режимы – свойство» к связям: «режимы – структура» и «структура – свойство» [139].

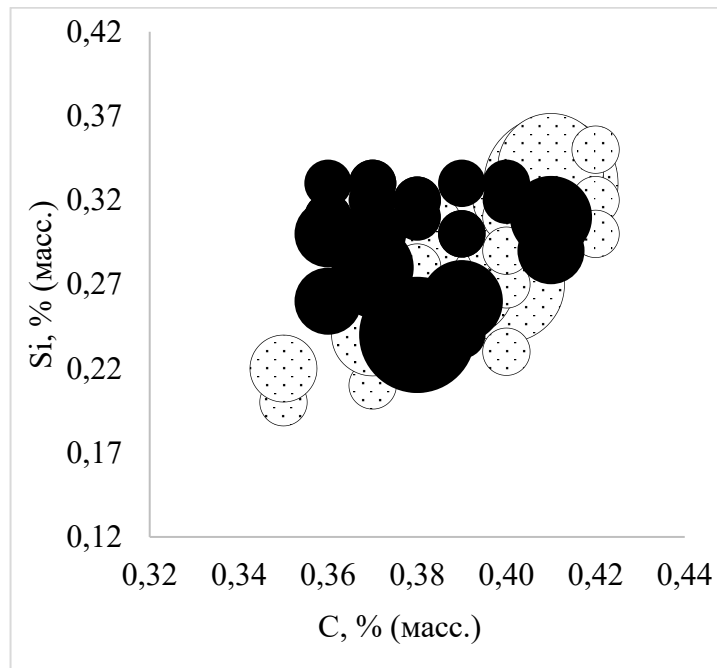
В поковках стали 38ХНЗМФА-Ш были определены предельные значения двухпараметрического критерия хладостойкости, отвечающим высокой (Зона I) и неудовлетворительной (Зона IV) хладостойкости, соответствует одновременное содержание

углерода и кремния на нижнем и верхнем пределах марочного состава соответственно (рисунок 49-50) [135].



а)

б)



в)

Рисунок 49 - Сопоставление информативности двухпараметрического (а, б) и однопараметрического  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  (в) критериев при оценке совместного влияния углерода и кремния на получение поковок с высокой (светлые области) и неудовлетворительной (темные области) хладостойкостью для образцов, вырезанных из торцевых темплетов диаметрами  $D_l$  (а, в) и  $D_s$  (б) [135]



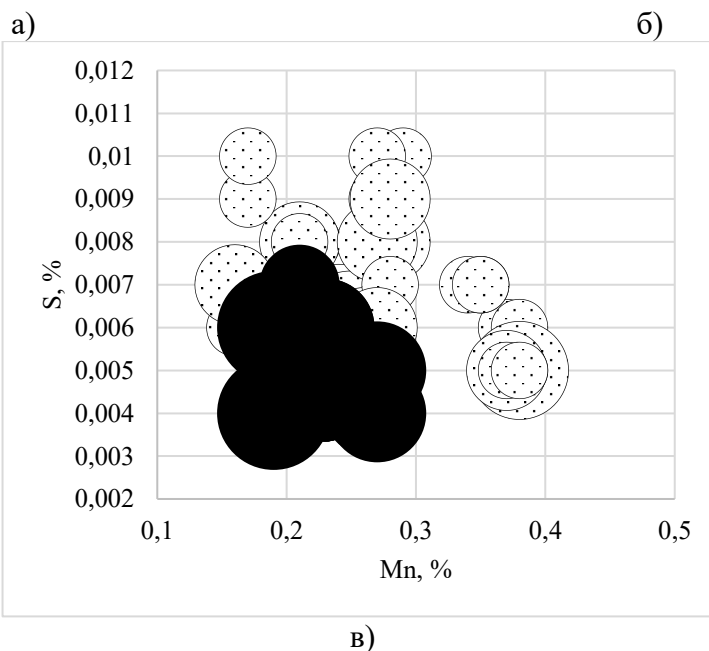
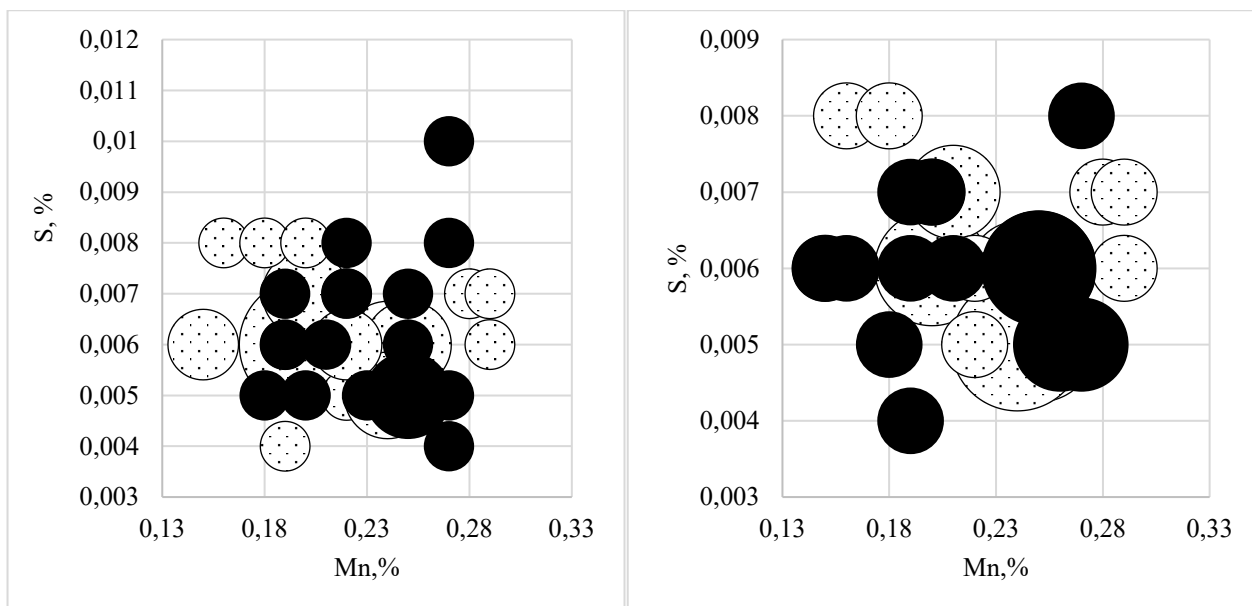


Рисунок 50 - Сопоставление информативности двухпараметрического (а, б) и однопараметрического  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$  (в) критериев при оценке совместного влияния марганец и серы на получение поковок с высокой (светлые области) и неудовлетворительной (темные области) хладостойкостью для образцов, вырезанных из торцевых темплетов диаметрами  $D_l$  (а, в) и  $D_s$  (б)

Как следует из полученных результатов оценка влияния параметров технологии только на «темп» снижения ударной вязкости  $\Delta_{ij} = KCU_{\max i}^{+20} - KCU_{\min j}^{-50}$ , без ее привязки к абсолютным значениям вязкости, для той же пары Si–С не выявила существенного расслоения облаков точек на области с высокой и неудовлетворительной хладостойкостью (рисунок 49, в) [135].

Выявление технологических факторов хладноломкости крупных поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш, природы её неоднородности не входило в рамки данной работы, где

решалась задача, связанная с оценкой возможности извлечения дополнительной информации о качестве металлопродукции, в частности её хладостойкости, на основе «раскопок данных» производственного контроля процесса и продукта в металлургии, развития с этой целью процедур обработки таких массивов данных [135]. Однако полученные предварительные результаты позволили сформулировать некоторые полезные соображения относительно дальнейшей работы с подобными базами данных. В частности, далеко не всегда двумерное отображение областей существования объектов в виде "облака точек" на разных плоскостях пар параметров  $x_i - x_m$  приводило к расслоению облака на два [135].

Полученный результат может быть признаком отсутствия вклада конкретных двух параметров в формирование уровня хладноломкости поковок из стали 38ХНЗМФА-Ш, но могут быть и иные причины этому, например, узкий диапазон изменения данной пары параметров, что является особенностью именно данной технологии. Например, в нашем случае температура нагрева поковок под закалку варьировалась в интервале температур 855–875 °С, что крайне мало для обеспечения её вклада в формирование свойств металла [135]. Как правило, при наличии выраженного разделения облака точек на два (области с доминирующим типом зависимости), наблюдались отклонения. Поштучный анализ некоторых поковок с высокой хладноломкостью, «попавших» в зону риска конкретной пары технологических параметров показал, что причиной этому могли быть, либо действие иного(-ых) параметра(-ов) нейтрализующих или компенсирующих отрицательное влияние рассматриваемой пары параметров. Например, если в поковке содержание серы и фосфора было на верхнем пределе, но при этом содержание углерода, кремния - на нижних, молибдена и ванадия на верхних пределах марочного состава, температуры нагрева под ковку и время выдержки в печи были минимальны, то хладостойкость оставалась на высоком уровне. Попадание поковок в благоприятную составляющую нормативного диапазона изменения того или иного параметра технологии обычно снижало риск получения хладноломкости, но не устраняло его полностью. Причины отклонений также просчитывались перебором содержательных гипотез о возможных причинах снижения вязкости и, как правило, это также была совокупность взаимосвязанных общей природой явлений и процессов отклонений значений параметров состава и технологии на всей её протяженности. Отсюда, кстати, есть определенные сомнения относительно чрезмерного ожидания успехов от применения технологий машинного обучения (и его вариаций) для решения задач сквозного управления качеством продукции в металлургии [142,143].

В этой связи, а также с учетом статистической природы объектов в металлургии, отсутствия единого пространства параметров технологии эффективным может быть, как

показано в работе применение эвристических подходов, в частности, с использованием разнообразных приемов когнитивной графики. Такой подход оказался полезным не только для выявления критических факторов хладостойкости, на этой основе был также предложен и обоснован двухпараметрический критерий хладостойкости.

Следует также отметить, выявление областей с доминирующим типом зависимости, получение ответов на выдвигаемые содержательные гипотезы могло быть облегчено и получить свое подтверждение при использовании более тонкой ранжировки структур и изломов, чем это было возможно в рамках имеющейся базы данных производственного контроля. В этой связи цифровизация измерений структур и изломов не только инструментарий для более объективной аттестации качества металлопродукции, но и возможность получения существенной информации для понимания причин неоднородности качества металлопродукции, как основы для выработки обоснованных управленческих технологических решений [19,145].

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что при статистическом анализе баз данных производственного контроля существенное значение для исключения побочных эффектов, снижающих информативность результатов приемо-сдаточных испытаний, играет соответствующая подготовка массива данных, направленная на исключение влияния трендов, сезонных колебаний, выбросов и т.п. В работе продемонстрирован анализ хронологических (временных) рядов значений параметров технологии и приемо-сдаточных параметров, который позволил в ряде случаев выявить области с доминирующим типом зависимости (по содержанию ниобия в стали 13Г1С-У), что существенно при проведении последующей статистической обработки баз данных производственного контроля, выявлении критических параметров технологии.

2. Систематический анализ представительных массивов данных производственного контроля процессов получения широкого спектра металлопродукции (крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш, сорта из улучшаемой стали 40ХМФА, листовых сталей 13Г1С-У, 09Г2С, 15ХСНД), в рамках, действующих в различные периоды времени технологий, подтвердил разнообразие видов распределения значений управляющих параметров (симметричное, асимметричное и бимодальное), которым соответствовал широкий диапазон изменений значений их коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_x$ : от  $-5,58$  до  $4,96$ , и от  $-2,00$  до  $11,95$  соответственно.

3. Наличие существенного диапазона вариации величин коэффициентов асимметрии и эксцесса для распределения значений параметров состава, технологии, приемо-сдаточных параметров, включая их размахи, вносит ограничения в применение процедур классической статистики. Различия в уровне риска гипотез об их схожести или значимости отличия одних и тех же выборок на основе критериев классической (в частности, Стьюдент) и непараметрической (Смирнов) статистики варьировались в интервале от  $0,02$  до  $0,5$ .

3. Оценены риски, связанные со снижением количества образцов при приемо-сдаточных испытаниях листовой стали 13Г1С-У с трех до двух (для каждой партии) приводит к увеличению количества минимальных значений размаха ударной вязкости  $\Delta$  (от  $0$  до  $34$  Дж/см<sup>2</sup>) на  $17-20$  % и снижению количества размахов в диапазоне от  $34$  до  $136$  Дж/см<sup>2</sup> в  $2 - 3,5$  раза. Это искажает оценку масштаба неоднородности вязкости стали. Для стали 38ХНЗМФА-Ш можно ожидать еще большего эффекта с учетом развитой неоднородности морфологии структур (дендритной, микро- и неметаллических включений).

4. При высоком риске прогноза регрессионных моделей ( $0,38 - 0,44$ ), определяющих влияние колебаний управляющих параметров (в пределах поля допуска технологии) на разброс характеристики качества, область их применения - для предварительного анализа

данных с выявлением групп технологических параметров потенциально «опасных» для появления разброса качества металлопродукции.

5. Расширено представление о возможностях применения приемов когнитивной графики – для оценки хладостойкости крупных поковок из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш, по результатам приемо-сдаточных ударных испытаний при плюс 20 °С и минус 50 °С. С её использованием предложен двухпараметрический критерий хладостойкости, учитывающий темп снижения ударной вязкости (разница между значениями ударной вязкости определенной при плюс 20 °С -  $X_{i\max}^{+20}$  и минус 50 °С -  $X_j^{\min-50}$   $X_j^{\min-50}$ ) и среднее значение ударной вязкости между ними  $\bar{X}_{ij} = (X_{i\max}^{+20} + X_j^{\min-50})/2$ .

6. Применение двухпараметрического критерия хладостойкости при двумерном отображении областей существования объектов в виде облака точек на плоскости пар параметров «углерод - кремний», позволило выделить зоны их риска (более 0,39 и 0,27%, масс. соответственно), где вероятность получения неудовлетворительной хладостойкости была максимальной и составляла  $\approx 0,75$

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сталь на рубеже столетий / Под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСиС, 2001. С. 445-543.
2. Обеспечение качества продукции: учебник / Э.Д. Хисамова, Э.Э. Зайнутдинова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, – 2018. – 170с.
3. Кудря А.В., Соколовская Е.А., Слагаемые качества современных сталей/ «Качество и жизнь», №1, – 2017. – 21-35с.
4. Gongzhuang Peng, Yinliang Cheng, Yufei Zhang, Jian Shao, Hongwei Wang, Weiming Shen, Industrial big data-driven mechanical performance prediction for hot-rolling steel using lower upper bound estimation method, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 65, 2022, Pages 104-114.
5. Manwendra K. Tripathi, Randhir Kumar, Rakesh Tripathi, Big-data driven approaches in materials science: *A survey, Materials Today: Proceedings*, Volume 26, Part 2, 2020, Pages 1245-1249.
6. Shun Guo, Jinxin Yu, Xingjun Liu, Cuiping Wang, Qingshan Jiang, A predicting model for properties of steel using the industrial big data based on machine learning, *Computational Materials Science*, Volume 160, 2019, Pages 95-104.
7. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов/учебник для вузов.:М., МИСиС, 1998. – 400 с.
8. Гуляев А. П., Металловедение. Учебник для ВУЗов. 6-е изд., перераб. и дополн. – М.: Металлургия, – 1986. – 544 с.
9. Бернштейн М.Л. Займовский В.А., «Структура и механические свойства металлов». – М: Металлургия, – 1970. – 472 с.
10. Штремель М.А., Алексеев И.Г., Кудря А.В. Взаимосвязь двух аномалий излома высоколегированной конструкционной стали // РАН. Металлы 1994. № 2. С. 96-103.
11. Мальцева Л.А., Гриб С.В., Столбовский А.В., учебное пособие: «Ликвация в сплавах», Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006.
12. Чалмерс Б. Теория затвердевания / Б. Чалмерс. –М.: Металлургия, –1968. –455 с.
13. Новиков, И.И. Золоторевский, В.С. Дендритная ликвация в сплавах. Москва: Наука. –1966. –156с.
14. Новиков, И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И., Металловедение, термообработка и рентгенография Москва: МИСИС. – 1994. – 146 с.
15. Голиков, И.Н.; Масленков, С.Б.; Дендритная ликвация в сталях и сплавах'; Изд-во: М.: Металлургия, 1977 г.
16. Пфанн В. Дж. Зонная плавка / Металлургиздат, Москва, - 1960, С. – 272.

17. Гольдштейн, М.И., Грачев, С.В., Векслер, Ю.Г. Специальные стали. Учебник для вузов. Москва: Металлургия. – 1985. С. – 19-29.
18. Взаимосвязь структурной полосчатости и механических свойств в конструкционных легированных сталях / М. В. Майсурадзе, О. А. Сурнаева, А. В. Ли, И. А. Махмутова, А. И. Бикбалтина, К. А. Винокурова // XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 5-9 декабря 2016: сборник научных трудов. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – Ч. 1. – 127-130с.
19. Кудря, А.В. Соколовская, Э.А. Прогноз разрушения материалов с неоднородной структурой // *Физика металлов и металловедение*. – 2022. Т. 123, – № 12. – 1334-1346с.
20. Бернштейн М.Л. Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979 – 496 с.
21. Эфрон Л.И., Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали — М.: Металлургиздат, 2012. — 696 с.
22. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А., Скородумов С.В., Папина К.Б., Мишнев П.А., Палигин Р.Б., Балашов С.А., Огольцов А.А. Факторы неоднородности качества листовой стали // *Электromеталлургия*. 2013. № 9. С. 23–33.
23. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ха Н.Н., Некоторые практические соображения, связанные с компьютерными процедурами обработки изображений в материаловедении // *Frontier Materials & Technologies* - 2019. - №4. – 35-44с.
24. Петрова Г.В., Металловедческая экспертиза разрушений конструкций по причине хладноломкости: исторический обзор, *Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли*, №2, – 2022, – 29-46с.
25. Кудря А. В. Об оценке хладноломкости конструкционных сталей по результатам серийных ударных испытаний / А. В. Кудря, Е. И. Кузько, Э. А. Соколовская. // *Деформация и разрушение материалов*. – 2013. – № 12. – С. 36-45.
26. Тулупов О.Н., Взаимосвязь современных тенденций развития производства металлопродукции и продукции тяжелого машиностроения // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2012. № 18. С. 152-158.
27. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Металловедение: [учебное пособие]. 3-е изд. перераб. и дополн. / Екатеринбург: УрФУ, 2012. — 344 с.
28. Чуманов В.И., Чуманов И.В., Повышение эффективности электрошлакового процесса и улучшение качества металла вращением расходоуемого электрода. Часть 1 // *Электromеталлургия*. – 2009 – №8, С.11- 17.

29. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. - М.: Metallurgy, 1970. - 239 с.
30. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов Ч2. –М: Машиностроение, – 1974.
31. Кислинг Р., Ланге Н., Неметаллические включения в стали, пер. с англ., М., 1968;
32. Бельченко, Г.И., Губенко, С.И. Неметаллические включения и качество стали. Киев: Техника. – 1980. – 168 с.
33. Штремель, М.А. Проблемы металлургического качества стали (неметаллические включения) // *МиТОМ*. – 1980. № 8. – 2-6с.
34. Карасёв А., Jönsson P.G., Сидорова (Мазова) Е.П., Комиссаров А.А., Кузнецов Д.В., Мишнёв П.А., Митрофанов А.В. Опыт использования метода объемного исследования неметаллических включений для оценки коррозионной стойкости трубного проката // *Сталь*. 2019. № 2. – 49-53с.
35. Мазова Е.П., Тихонов С.М., Комиссаров А.А., Матросов М.Ю., Адигамов Р.Р., Мишнев П.А., Кузнецов Д.В., Опыт использования современных методов исследования неметаллических включений в низколегированном металлопрокате // *Проблемы черной металлургии и материаловедения* // Издательство: Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, №4. – 2022. – 66-77с.
36. Павлов, В.В., Темлянцев М.В., Трошкина А.В., О связи усталостных показателей с прочностными свойствами стали и роли неметаллических включений // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, Издательство: Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, - 2020, - 44-50с
37. Хейфец МЛ., Васильев А. С., Клименко С.Л., Танович Л. Технологическая наследственность в процессах производства и реновации изделий, 67(2), стр. 8 - 13, ООО «БОИМ», 2015
38. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын [и др.]. - Новополоцк: ПТУ, 1996. – 136 с.
39. Технологические основы управления качеством машин / А.С.Васильев [и др.]. - М.: Машиностроение, 2003.
40. Панов В.И., Технологическая наследственность металла крупногабаритных конструкций / В. И. Панов, С. В. Кандалов // *Сварка и диагностика: тезисы докладов форума* (Екатеринбург, 14–16 ноября 2017 г.) — Екатеринбург: УрФУ, 2017. — С. 104-106.
41. Трубецков Д.И., Феномен математической модели Лотки–Вольтерры и сходных с ней // *Известия вузов. ПНД*. 2011. Т. 19, вып. 2. С. 69-88.



42. Вольтерра, В. Математическая теория борьбы за существование. Пер. с франц. О.Н. Бондаренко; под ред. и с послесл. Ю.М. Свирижева. – М.: Наука, 1976. – 286 с.
43. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. – Минск: Наука и техника, 1971. – 210 с.
44. Рыжов, Э.В., Горленко, О.А. Влияние технологической наследственности на формирование микронеровностей // Сборник «Микрогеометрия и эксплуатационные свойства деталей машин». – Рига: Изд. «Зинатне2, 1972. – С. 12-14.
45. Аверченков, В.И., Рыжов, Э.В., О влиянии технологической наследственности при электромеханической обработке на износостойкость трущейся пары // Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей машин: Тез. докл. Всесоюзной конф. – М., 1973. – С. 5-6.
46. Рыжов, Э.В., Бауман, В.А. Влияние технологической наследственности на качество поверхности при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД) // Вестник машиностроения. – 1973. – №10. – С. 59- 62.
47. Лобанов М.Л., Бородина М.Д., Данилов С.В., Пышминцев И.Ю., Струин А.О. Текстурная наследственность при фазовых превращениях в малоуглеродистой низколегированной трубной стали после контролируемой термомеханической обработки, Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. No 11. С. 910 – 918.
48. Endo S., Nakata N. Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and high performance steel in JFE Steel // JFE Technical Report. 2015. No. 20. P. 1 – 7.
49. Аверченков В.И., Васильев А.С., Хейфец М.Л., Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей, Научно-технические технологии в машиностроении, № 10, 2018, С.-27-32.
50. Кудря А.В., Соколовская Э.А. Неоднородность разномасштабных структур и вязкость конструкционных сталей // Известия РАН. Серия "Физическая".–2004.–Т. 68.–№ 10.–С. 1495
51. Полякова М.А., Ширяева Е.Н., Налимова М.В., Системный анализ технологического процесса горячей прокатки стальной полосы// Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 2, С. 360-369.
52. Ширяева Е.Н., Полякова М.А., Использование вероятностного подхода при математическом моделировании развития сложной технологической системы // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол, 2023.

53. Контроль качества сварных и паяных соединений: справочное издание / Л.П. Герасимова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 376 с.: ил. 254.
54. Герасимова Л. П., Голубков Д. Е., Гук Ю. П. Стандартные методы контроля качества металлических материалов, сварных и паяных соединений. М.: Инфра-Инженерия, 2024, 668 с.
55. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
56. Гнеденко Б. В. Очерк по истории теории вероятностей. — Москва: УРСС, 2001.
57. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник / В.А.Колемаев, В.Н.Калинина. – М.: ИНФРА-М, 2001.
58. Большая советская энциклопедия [В 30 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров. — 3-е изд. Т. 1-. — Москва: Сов. энциклопедия, 1969-. —; 26.
59. Непомнящая Н.В., Григорьева Е.Г., Статистика: общая теория статистики, экономическая статистика. Практикум: учебное пособие для вузов по направлению подготовки 38.03.01 "Экономика" /; Сиб. федер. ун-т, Ин-т экономики, упр. и природопользования. - Красноярск: СФУ, 2015. С.-375.]
60. Основы теории статистики: [учеб. пособие] / В. В. Полякова, Н. В. Шаброва ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – 2-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 148 с.
61. Калинин В.Н., Панкин В.Ф., Математическая статистика: Учеб. для студ. Сред. спец учеб. заведений- 4-е изд., испр. – М. Дрофа, 2002. – 336 с.],
62. Чернова, Н. И. Математическая статистика: учеб. пособие / Н. И. Чернова; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск, – 2007.
63. Савастенко Н.А., Математическая статистика. Курс лекций: учеб.-метод. пособие. / Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2015.
64. Статистика для всех / С. Бослаф; Пер. с англ. П. А. Волкова, И. М. Флямер, М. В. Либерман, А. А. Галицына. — Москва: ДМК Пресс, 2015. — 586 с.
65. Ильяшенко Л.К., Анализ параметрических и непараметрических методов статистики для решения инженерных задач // *Научный журнал Перспективы науки*, №3, 2017, С. 134-136.
66. Орлов А.И., Распределения реальных статистических данных не являются нормальными, *Научный журнал КубГАУ*, №117(03), 2016, С. 71-90.
67. Hollander, Myles, et al. Nonparametric Statistical Methods, John Wiley & Sons, Incorporated, John Wiley & Sons, Inc. 2013, С.-809

68. Осипов Р.А. Непараметрические методы исследований, Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие" сборник избранных статей. Санкт-Петербург, 2021, С.63-66.

69. Тимошенко В.В., Буданова Е.С., Кодиров Д.Ф.У., Соколовская Э.А., Кудря А.В. О выборе областей с доминирующим типом зависимости при анализе данных производственного контроля // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. N. 3. P. 103-114.

70. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Подходы к применению предиктивной аналитики в материаловедении и металлургии. В сборнике: Физическое материаловедение. Сборник материалов XI международной школы. Тольятти, 2023. С. 21.

71. Пастух Е.С., Кодиров Д.Ф., Соколовская Э.А., Кудря А.В., Методы когнитивного анализа как инструмент управления качеством металлопродукции, В сборнике: Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2020/2021. Сборник трудов X Евразийской научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 143.

72. Кудря А.В., Соколовская Э.А. Информационные технологии в обеспечении качества металлопродукции // *Электрометаллургия*. 2010. № 12. С. 35–43.

73. Шаранова А.Е., Кудря А.В. Оценка возможностей классической статистики для прогноза свойств металлопродукции на основе «раскопок данных» производственного контроля, «Творчество молодых - родному региону» - сборник материалов X региональной межвузовской научно-практической конференции. Казань, 2023, С.-80-83.

74. Кудря А.В., Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Соколовская Э.А., Ахмедова Т.Ш., Васильев С.Г., Возможности статистического анализа результатов приемо-сдаточных испытаний для определения масштабов неоднородности качества трубных сталей// *Металлург* / Издательство: Металлургиздат, 2018, С.64-68.

75. Нойер М.Й., Эбель А., Брандербургер Й., Полцер Я., Вольф А., Лоос М., Хольцкнехт Н., Петерс Х. Цифровые технологии в производстве стали // *Черные металлы*. 2019. №3, С. 54-58.

76. Манжула Г.П., Цифровые технологии в производстве литых заготовок металлических деталей // *Международная Научно-Техническая Конференция «Литейное Производство И Металлургия 2017. Беларусь»*

77. Тохтамышев А.Н., Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Ронков Л.В., Сукочев А.Ю., Дуб В.С., Косырев К.Л., Толстых Д.С., Разработка модуля контроля и управления этапом разлива стали в крупные кузнечные слитки в рамках цифровой системы управления качеством в металлургическом производстве // *Тяжелое машиностроение*, №3, - 2023, С. 9-18.

78. Солер Я.И. Лгалов В.В., Стрелков А.Б. Оценка режущих свойств абразивных кругов различной пористости по критерию точности формы плоских деталей штампов из стали X12 // *Металлообработка*, 2012. № 1 (67). С. 5-10.
79. Бараз В.Р., Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel: учебное пособие / В.Р. БАРАЗ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2005. – 102 с.
80. Kleinbaum, David G.; Kupper, Lawrence L.; Muller, Keith E., Applied regression analysis and other multivariable methods, Boston, Mass.: PWS-Kent Publ. Co.; - 1988.
81. Шорохова И. С., Кисляк Н. В., Мариев О. С., Статистические методы анализа: [учеб. пособие] / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 300 с.
82. Ивченко, Г. И. Математическая статистика: учеб. пособие / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – М.: Высш. шк., – 1984. – 248 с.
83. George A. F. Seber, Alan J. Lee, Linear Regression Analysis, John Wiley & Sons, – 2003, – С.592
84. Гаранжа И.М., Регрессионный анализ напряженно-деформированного состояния металлических многогранных стоек, Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 9 (14). 2013. 11-20.
85. Костин Г.В., Святкин А.В., Оценка адекватности моделей прогнозирования фазового состава кремнисто-марганцевой латуни // В сборнике: Физическое материаловедение. Сборник материалов XI международной школы. Тольятти, 2023. С. 163.
86. Каграманян Т.С., Бабешко Л.О., Оценка параметров регрессионной модели методом наименьших квадратов в Excel, *Интерактивная наука*, №2, 2016, С. -143-146.
87. Атырова Р.С., Жуманова А.Э., Информационно-аналитические системы для обработки больших данных (Big Data) // Известия НАН КР, 2022, №5, С. 121-126.
88. Big Data: Principles and Best Practices of Scalable Real-Time Data Systems, Nathan Marz, James Warren, Manning, 2015, С. – 308
89. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think, Mayer-Schonberger Viktor, Cukier Kenneth, HarperCollins, -2014, С.- 256.
90. Что такое аналитика больших данных. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azure.microsoft.com> (дата обращения: 20.08.2024).
91. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. - McKinsey Global Institute, 2011.
92. Бурков Андрей, Машинное обучение без лишних слов. — СПб.: Питер, 2020. — 192 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-4461-1560-0

93. Что такое машинное обучение. [Электронный ресурс]. - Режим доступа – URL: <https://azure.microsoft.com> (Дата обращения 26.08.2024)
94. Mantari J.L., Coronado A. A contemporary approach to the MSE paradigm powered by Artificial Intelligence from a review focused on Polymer Matrix Composites // *Mechanics of Advanced materials and Structures*. 2021.
95. Колобков А.С., Гуляев И.Н., Разработка полимерных композиционных материалов с применением искусственного интеллекта // *Композитный мир*, 2023. №2. С. 42-47.
96. Liuchao Jin, Xiaoya Zhai, Kang Wang, Kang Zhang, Dazhong Wu, Aamer Nazir, Jingchao Jiang, Wei-Hsin Liao. Big data, machine learning, and digital twin assisted additive manufacturing: A review, *Materials & Design*, Volume 244, 2024.
97. Lee, J.H., Kim, M.Y. Manufacturing Quality Management Based on TimeGAN and Seq2Seq Models With Magnetic Press Machine Data. *Int. J. Control Autom. Syst.* 23, 1199–1209 (2025).
98. Е.И. Орешко, В.С. Ерасов, И.Г. Сибяев, А.Н. Луценко, П.В. Шершак Алгоритмы машинного обучения (обзор) Часть 1. Задачи классификации и регрессии, линейные алгоритмы в машинном обучении. Применение алгоритмов машинного обучения для расчетов прочностных характеристик материалов // *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн.*, 2022. №3. Ст. 12.
99. Е.И. Орешко, В.С. Ерасов, И.Г. Сибяев, А.Н. Луценко, П.В. Шершак Алгоритмы машинного обучения (обзор) Часть 2. Метрики машинного обучения. Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев. Алгоритм нейронной сети по прогнозированию свойств ферритно-мартенситной стали // *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн.*, 2022. №4. Ст. 12.
100. Рашка С. P28 Python и машинное обучение / пер. с англ. А. В. Логунова. - М.: ДМК Пресс, 2017. - 418 с.
101. Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт внедрения машинного обучения для расчета качества и производства агломерата. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024;67(1): С. 76-82.
102. Шустер Р., Фойгт Н., Натх Г., Лув Н. Возможности цифровых технологий по трансформации ценностных цепочек в металлургии и металлообработке // *Черные металлы*, 2019. №3. С. 59-61.
103. Линднер К., Рашевски Ф., Вайнберг М. Новые возможности управления качеством благодаря прогрессу в контроле технологических процессов в компании Hüttenwerke Krupp Mannesmann // *Черные металлы*. 2018. №1. С. 63-69

104. I. J. Cox, R. W. Lewis, R. S. Ransing, H. Laxzczewski, and G. Berni, "Application of neural computing in basic oxygen steelmaking," *J. Mat. Processing Technol.*, 310–315, Jan. 15 (2002).
105. Фролова С.А. Александров В.Д. Живченко В.С., Учебное пособие по курсу «Материаловедение и технология конструкционных материалов», – ГОУ ВПО «ДонНАСА», – Макеевка – 2006.
106. Dobrzanski L. A., Honysz R. Application of artificial neural networks in modeling of normalized structural steels mechanical properties // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. Vol. 32. Iss. 1. P. 37–45.
107. Нейроинформатика / А.Н.Горбань, В.Л.Дунин-Барковский, А.Н.Кирдин и др. - Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. - 296с.
108. Одарченко, И. Б. Интеграция нейросетевых моделей в процессы технологической подготовки производства отливок / И. Б. Одарченко, В. А. Жаранов, И. Н. Прусенко // *Литье и металлургия*. 2018. № 4. С. 45–49.
109. Соболева Н. Н. Применение нейронных сетей для анализа микроструктуры металла / Н. Н. Соболева. — Текст: электронный // *Уральская школа молодых металлургов: сборник статей XXII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов — молодых ученых (Екатеринбург, 23-27 октября 2023)*. — Екатеринбург: Издательский Дом «Ажур», 2023. — С. 407-411.
110. *Nonparametric Statistics: A Step-by-Step Approach*. Front Cover. Gregory W. Corder, Dale I. Foreman. John Wiley & Sons, May 12, 2014, С. – 288.
111. Орлов А.И. Основные этапы становления статистических методов // *Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]*. – Краснодар: КубГАУ, – 2014.
112. Рунион, Р. Справочник по непараметрической статистике / Р. Рунион. – М.: Финансы и статистика, 2013. – 100с.
113. Герасимов А.Н., Морозова Н.И., Параметрические и непараметрические методы в медицинской статистике, *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика* № 5 (84)/2015 С. 6-12.
114. Будрейка Н.Н. Непараметрические методы исследования в психологии // *Психологическая наука и образование*. 2007. Том 12. № 1. С. 40–48.
115. Борисов В.И. Применение непараметрической статистики для анализа данных в современной экономике / В.И. Борисов, С.О. Полянский // *Совершенствование инструментария финансового обеспечения стратегического развития экономических систем РФ: сборник материалов Международной научно-практической конференции* / Под. общ. ред. Н.М. Тюкавкина. — Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. — С. 162-165.

116. Вулф, Д.А. Непараметрические методы статистики / Д.А. Вулф, М. Холлендер. – М.: *Финансы и статистика*, 2013. – 520 с.
117. Горохов В.Л., Витковский В.В., Холодняк Д.В., Практика анализа научных метафор на основе когнитивных образов многомерных данных, Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, Том 2, – 2017, С.-427-429.
118. Kudrya A. V., Sokolovskaya E. A., Kodirov D., Bosov E. V., & Kotishevskiy G. V. On necessity of taking into account statistical nature of the objects using Big Data in metallurgy // *CIS Iron and Steel Review*. 2022. №1. P.105–112.
119. Крупкина, Т. В. Математическая статистика: метод. указания / Т. В. Крупкина, Г. А. Федоров. – Красноярск: ИПК СФУ, – 2009. – 52 с. – (Математическая статистика: УМКД № 1455-2008 / рук. творч. коллектива Т. В. Крупкина).
120. Мельниченко А.С., Анализ данных в материаловедении. Часть 1. М.: Издательский дом МИСиС, – 2013.
121. Айвазян С. А. и др. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. — М.: *Финансы и статистика*, 1983. — 471 с.
122. Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф., Использование MS Excel для анализа статистических данных. / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, – 2014. – 181 с.
123. Большев Л.Н., Смирнов Н.В, Таблицы математической статистики (1983), С - 9.
124. Володин И. Н. Лекции по теории вероятностей и математической статистике. – Казань: (Издательство), 2006. – 271 с.
125. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М.: Наука, 1972.-524с.
126. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с. ISBN 978-5-534-00211-9
127. Штремель М.А., «Инженер в лаборатории», - М., - 1983. -128с.
128. Соколовская Э.А., Босов Е.В., Кудря А.В., Кодиров Д.Ф., Алексеев В.И., О возможных последствиях, вызванных уменьшением количества образцов при приемосдаточных испытаниях единицы металлопродукции, для оценки её качества // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2025;68(3):
129. Guangfei Pan, Feiyang Wang, Chunlei Shang, Honghui Wu, Guilin Wu, Junheng Gao, Shuize Wang, Zhijun Gao, Xiaoye Zhou, and Xinping Mao, Advances in machine learning- and

artificial intelligence-assisted material design of steels, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 30(2023), No. 6, pp.1003-1024.

130. Wei J.; Chu X.; Sun X.Y.; Xu K.; Deng H.X.; Chen J.; Wei Z.; Lei M. Machine learning in materials science. *InfoMat* 2019, 1, 338–358.

131. Sandhya N.; Sowmya, V.; Bandaru C.R.; Raghu Babu G. Prediction of Mechanical Properties of Steel using Data Science Techniques. *Int. J. Recent Technol. Eng.* 2019, 8, 235–241.

132. Sitek W.; Trzaska J. Practical Aspects of the Design and Use of the Artificial Neural Networks in Materials Engineering. *Metals* 2021, 11, 1832.

133. Yuling Chang, Christian Haase, Danuta Szeliga, Lukasz Madej, Ude Hangen, Maciej Pietrzyk, Wolfgang Bleck, Compositional heterogeneity in multiphase steels: Characterization and influence on local properties, *Materials Science and Engineering: A, Volume 827*, 2021.

134. Daniela V. Klein, Jonas Faleskog, Influence of heterogeneity due to toughness variations on weakest-link modeling for brittle failure, *Engineering Fracture Mechanics, Volume 292*, 2023.

135. Кудря А.В. Соколовская Э.А., Кодиров Д.Ф. Босов Е.В., Оценка хладноломкости крупных поковок из улучшаемой стали 38ХН3МФА-Ш на основе «раскопок данных» приемо-сдаточного контроля // *Деформация и разрушение*, – 2025. – № 4. – С. 29-39.

136. Штремель М.А. Разрушение. В 2 кн. Кн. 2. Разрушение структур. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 976 с.

137. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. М.: Металлургия, 1997. 224 с.

138. Кругасова, Е. И. Надежность металла энергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.

139. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Кодиров Д.Ф., Босов Е.В., Тимошенко В.В. Возможности "раскопок данных" производственного контроля в металлургии для прогноза прочности, пластичности и вязкости металлопродукции // *Деформация и разрушение материалов*. 2023. № S3. С. 31-40.

140. Дюк В., Самойленко А. *Data Mining. Учебный курс*. СПб.: Питер, 2001. 368 с.

141. Хлусова Е.И., Сыч О.В., Орлов В.В. Хладостойкие стали. структура, свойства, технологии // *Физика металлов и металловедение*. 2021. Т. 122. № 6. С. 621-657.

142. Saoudi A., Fellah M., Hezil N., Lerari D., Khamouli F., Atoui L., Bachari K., Morozova J. E., Obrosova A., & Mohammed A. Prediction of mechanical properties of welded steel X70 pipeline using neural network modelling // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020. V. 186. P.



143. Колобов А.В., Малышев К.В., Варфоломеев И.А., Иванов Д.А., Богачев Д.В. Повышение эффективности работы прокатного стана за счет прогнозирования дефектов непрерывнолитой заготовки // *Производство проката*. 2017. № 9. С. 39-42.

144. Казаков А.А., Киселев Д.В., Казакова Е.И. Количественные методы оценки микроструктуры стали и сплавов для пересмотра устаревших ГОСТ // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 42-48.

145. Босов Е.В., Д.Ф. Кодиров, Г.В. Котишевский, А.В. Кудря, Э.А. Соколовская. О возможности разработки интеллектуальных систем сквозного управления качеством металлопродукции // Сб. трудов XI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2023. 18-20 апреля 2023 года. – Москва, НИТУ МИСИС. – М.: ООО «Студио-Принт», 2023. – С. 159.

## ПРИЛОЖЕНИЕ



Совершенство  
продуманных  
решений

Акционерное общество  
«Выксунский  
металлургический завод»

В диссертационный совет НИТУ «МИСИС»  
Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.  
г.Москва, 119049  
e-mail: dissivet@misis.ru

### **Акт о практическом применении в АО «Выксунский металлургический завод» (АО «ВМЗ»)**

Подтверждаем, что результаты кандидатского диссертационного исследования Босова Е.В. на тему: «Оценка возможности повышения эффективности ретроспективного анализа массива данных производственного контроля процесса и продукта для управления качеством металлопродукции» обладают актуальностью и представляют практический интерес для проведения факторного анализа причин неоднородности качества металлопродукции.

АО «ВМЗ» подтверждает применение алгоритмов и методов статистических процедур при решении прикладных исследовательских задач, направленных на повышение однородности качества металлопродукции. Результаты исследования опубликованы в научных статьях, где подробно описаны методы выбора областей оптимального применения регрессионного и корреляционного анализа, а также расширения использования когнитивной графики.

Научная новизна исследования подчёркивает спектр применения статистических методов в сочетании с ограничением вариаций значений параметров (полем допуска технологии), что может усложнить использование многих алгоритмов больших данных, основанных на предположении о нормальном (симметричном) распределении величин и соответствующих параметров и критериев классической статистики. Показана неэффективность применения регрессионного и корреляционного анализа для прогнозирования качества металлопродукции из-за отсутствия единого пространства параметров,



SSSMM082C00ESN20915

что делает принцип управления качеством металла «по возмущению» также неэффективным.

В исследовании продемонстрировано эффективное использование методов когнитивной графики для выявления областей с доминирующим типом зависимости и оценки различий в хладноломкости металла поковок.

Директор инженерно-  
технологического центра  
АО «ВМЗ», к.т.н.



А.В. Мунтин