

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра термообработки и физики металлов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой _____

_____ (подпись) _____ (Ф.И.О.)
« _____ » _____ 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МЕДНОЙ КАТАНКИ**

2021 22.04.01 М58

Научный руководитель:

доцент, к.т.н Зорина М. А.

Нормоконтролер: Майсурадзе М.В

Студент группы НМТМ-292003 Замятин А.И.

Екатеринбург

2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра термообработки и физики металлов
Направление подготовки 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
Образовательная программа 22.04.01/33.02 Физическое материаловедение специальных сплавов

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ Попов А.А.
«___» _____ 202__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Замятина Андрея Игоревича группы НМТМ-292003
(фамилия, имя, отчество)

1. Тема выпускной квалификационной работы «Влияние структурных параметров на механические свойства медной катанки»

Утверждена распоряжением по институту от «12» января _____ 2021 г. № 33.20-05/5 _____

2. Руководитель Зорина Мария Александровна, доцент, доцент, к.т.н.
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3. Исходные данные к работе Образцы медной катанки, монографическая и периодическая журнальная литература по тематике работы.

4. Перечень демонстрационных материалов Данные о структуре, размере зерна медной катанки при различных обработках, данные о механических испытаниях в виде графиков и таблиц.

5. Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
1.	Аналитический обзор литературы	до апреля 2021 г.	
2.	Проведение эксперимента	до мая 2021 г.	
3.	Анализ полученных результатов	до мая 2021 г.	
4.	Оформление дипломной записки	до мая 2021 г.	
5.	Подготовка иллюстраций к защите	до июня 2021 г.	

Руководитель _____ Зорина М.А.
(подпись) Ф.И.О.

Задание принял к исполнению _____
дата (подпись)

6. Выпускная квалификационная работа закончена «___» _____ 202__ г.

считаю возможным допустить _____ к защите его выпускной квалификационной работы в Государственной экзаменационной комиссии.

Руководитель _____
(подпись) Ф.И.О.

7. Допустить _____ к защите выпускной квалификационной работы в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры №___ от «___» _____ 202__ г.).

Зав. кафедрой _____
(подпись) Ф.И.О.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит: 70 страницы, 28 рисунков, 13 таблиц, 31 литературный источник.

МЕДНАЯ КАТАНКА КМ001-8, МИКРОСТРУКТУРА, МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Объектом исследования является медная катанка марки М001 диаметром 8мм из чистой меди марки М0 промышленного электролиза. На основе результатов собственных экспериментов в работе выполнен анализ свойств и микроструктуры меди при различных производственных настройках.

THE ABSTRACT

The explanatory note contains: 70 pages, 28 figures, 13 tables, 31 literature sources.

COPPER ROLL KM001-8, MICROSTRUCTURE, MICROINDENTING, MECHANICAL PROPERTIES

The object of research is copper wire rod M001 with a diameter of 8 mm made of pure copper M0 of industrial electrolysis. Based on the results of our own experiments, we analyzed the properties and microstructure of copper at various production settings.

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАНИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
РЕФЕРАТ	2
THE ABSTRACT	4
СОДЕРЖАНИЕ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	7
1.1 Общие сведения о меди	7
1.1.1 Электротехническая медь. Марки, состав	7
1.1.2. Характеристики основных физико-механических свойств меди	7
1.1.3 Легирование кислородом технической меди	10
1.2 Влияние микроструктуры медной катанки на ее механические свойства.....	11
1.3 Производство медной катанки.....	12
1.3.1 Общая информация об АО "Уралэлектромедь"	12
1.3.2 Производство медной катанки.....	13
1.3.3 Линия осветления и охлаждения	27
2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
2.1 Материал исследования.....	29
2.2 Методы исследования, оборудование, приборы.....	30
2.2.1 Препарирование образцов.....	30
2.2.2. Механические испытания	35
2.2.3 Оптическая металлография.....	40
2.3 Методы оценки ошибки измерений	40
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	42
2.3 Исследования с обычными настройками производства.....	42
3.2 Опыт с дополнительной настройкой трайб аппарата.....	46
3.3 Опыт с медленной скоростью охлаждения	49
3.4 Анализ взаимосвязей	59
3.4 Выводы	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие проводниковых технологий влечёт за собой не менее стремительный рост уровня запрашиваемых механических, электрофизических и химических свойства новых материалов. Этот запрос следует из развития множества технологий, требующих для своих реализаций совершенно нового уровня свойств.

Для удовлетворения этих запросов ежедневно трудятся сотни и тысячи материаловедов. Постоянно появляются новые сплавы и находятся способы улучшения старых посредством различных вариантов производства и обработки. Всё это требует множества знаний и огромного количества экспериментальных исследований для выявления идеального баланса под поставленные задачи. Материаловедческие исследования, как и производственные технологии, ещё далеки от полного изучения и являются на данный момент очень перспективным вектором развития. Множество из этих исследований нацелены на изучение меди, её структуры и свойств. В её достоинства безусловно можно записать возможность повышения пластических свойств при сохранении достойного уровня прочности и электросопротивления. Для максимальной реализации всех преимуществ меди требуется её глубокое изучение по всем возможным аспектам.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1 Общие сведения о меди

1.1.1 Электротехническая медь. Марки, состав

Медь является одним из нескольких металлов, который находит более широкое применение в чистом виде, чем в виде сплава. Различают две группы марочных составов электротехнической меди: бескислородную и кислородсодержащую. Наиболее широко используемой является электролитная, технически чистая медь (зарубежный аналог – electrolytic tough pitch copper – ЕТР), которая состоит из металла чрезвычайно высокой чистоты, легированного кислородом в диапазоне от 100 до 650 ppm. При этом заготовкой для кабельного производства может выступать литой или горячекатаный материал. ЕТР медь не рекомендуется для использования в водородной среде из-за ее восприимчивости к водородной хрупкости [1].

В соответствии со стандартом (ГОСТ 859-2001) марки меди по химическому составу и способам металлургической переработки (способам рафинирования) делят на пять групп [2]:

1) медь огневого рафинирования, которую выплавляют в обычных печах (99,5...99,7 % Cu);

2) электролитическая катодная медь, полученная методом электролиза (99,93...99,97 % Cu);

3) медь переплавленная, при производстве которой для обработки расплава вводят в него специальный раскислитель (99,5...99,9 % Cu с содержанием кислорода менее 0,01 % и при остаточном раскислителе (фосфор) 0,0012...0,06 %);

4) медь бескислородная, выплавляемая в восстановительной или инертной атмосфере с применением покровного флюса и поверхностно-активных веществ, в том числе и углерода (99,95...99,99 % Cu);

5) медь, выплавленная в вакуумируемом объеме (99,95...99,99 % Cu).

С 20 века главное применение меди обусловлено ее высокой электропроводимостью. Более половины добываемой меди используется в электротехнике для изготовления различных проводов, кабелей, токопроводящих частей электротехнической аппаратуры. Из-за высокой теплопроводности медь — незаменимый материал различных теплообменников и холодильной аппаратуры [3].

1.1.2. Характеристики основных физико-механических свойств меди

Физические свойства Медь в периодической таблице металлов имеет порядковый номер 29, плотность в твердом состоянии 8,9 г/см³, в состоянии расплава (при 1083 °С) 8,3 г/см³. Тип структуры – ГЦК-решетка, параметр решетки $a = 0,36153$ нм, ближайшее межатомное расстояние 0,2556 нм, атомный

радиус 0,128 нм. Температура плавления 1083°C, температура кипения 2600 °С. Теплота плавления 0,213 МДж/кг, теплота испарения 5,4 МДж/кг. Удельная теплоемкость при 20 °С 386 Дж/(кг*град), в состоянии расплава 545 Дж/(кг*град). По магнитным свойствам медь является диамагнетиком. Для поликристалла меди упругие свойства описываются следующим образом: модуль объемной упругости (коэффициент объемного сжатия) $K=142$ ГПа; модуль нормальной упругости (модуль Юнга) $E=125$ ГПа; модуль сдвига (модуль касательной упругости) $G=46,4$ ГПа; коэффициент Пуассона 0,34. Коэффициент линейного расширения (КТР) меди существенно зависит от температуры (рисунок 1.1). Особенно ощутимо это влияние в диапазоне температур ниже комнатных, при повышении температуры КТР возрастает. Значения КТР приходится учитывать в случае работы изделий из меди при повышенных температурах, например в теплообменных аппаратах. Кроме того, этот фактор приходится учитывать при эксплуатации изделий из меди, работающих даже в относительно небольшом температурном диапазоне, но имеющем большую длину, когда даже небольшое изменение температуры вызывает за счет большой длины проводника большое приращение этой длины. В качестве примера можно привести режимы эксплуатации электроконтактных сетей железнодорожного и муниципального транспорта.

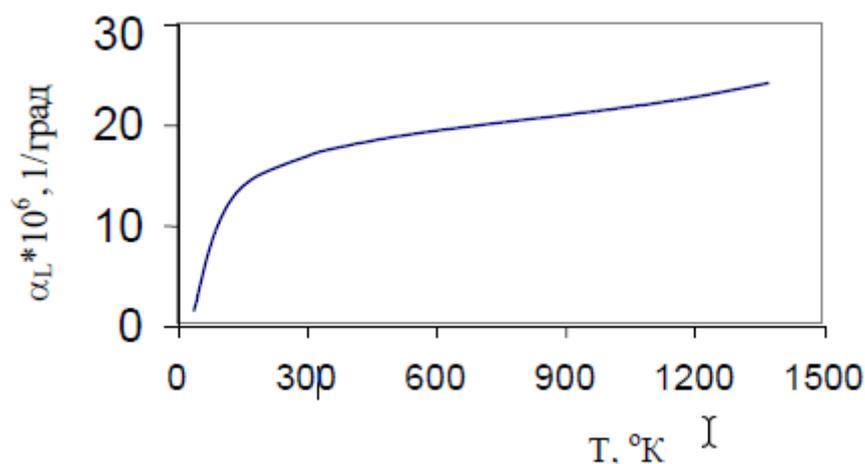


Рисунок 1.1 Зависимость коэффициента линейного термического расширения от температуры для меди [4]

В промышленности композиционных материалов медь часто является матрицей по отношению к другим металлам (например, по отношению к волокнам сверхпроводящего сплава ниобий-титан), имеющим иной коэффициент термического расширения. При совместной термической обработке таких материалов возможно появление значительных термических напряжений из-за разницы в КТР.

Существенна также зависимость от температуры удельного электрического сопротивления (рисунок 1.2). Эта зависимость важна, поскольку медь часто

выступает в качестве материала – проводника электрического тока. Как видно из графика, удельное электрическое сопротивление нелинейно возрастает с повышением температуры, причем темп возрастания при высоких температурах выше, чем при пониженных температурах.

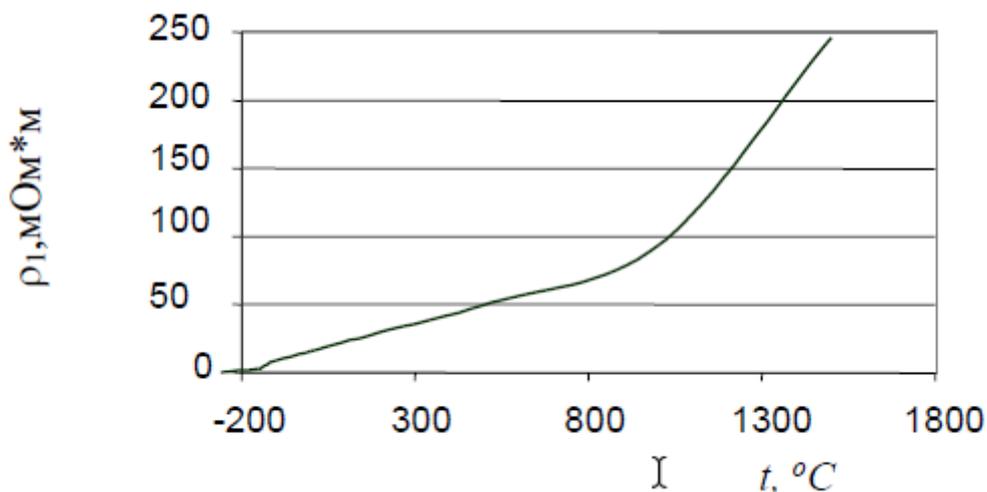


Рисунок 1.2 Удельное электрическое сопротивление меди технической чистоты в зависимости от температуры [4]

Вообще говоря, медь является одним из лучших материалов для изготовления проводников тока. В массовых масштабах по применению в этой области с ней конкурирует лишь алюминий, электропроводность которого в 1,58 раза меньше, чем у меди, поэтому для изготовления электрических сетей равной мощности требуется по объему в 1,58 раза больше алюминия, чем меди. По массе алюминия потребуется меньше, чем меди, однако алюминий обладает гораздо меньшими прочностью и пластичностью, что создает неудобства при монтаже и ремонте электропроводящих систем.

Механические и технологические свойства. Технолога интересуют прежде всего технологические свойства, к которым можно отнести сопротивление деформации, показатели пластичности, характеристики окалинообразования и др. Часть из этих параметров можно отнести и к потребительским свойствам, т. е. к тем параметрам, которые анализируются конструкторами машин и устройств и которые записаны в нормативных документах по поставке продукции. Механические свойства, характеризующие прочностные и пластические свойства меди, представлены ниже.

Для меди марки М0:

$$\sigma_{\text{в}} = 230 + 8 \varepsilon \%^{0,72} \text{ МПа [5]}, \quad (1.2)$$

$$\sigma_{0,2} = 75 + 56 \varepsilon \%^{0,41} \text{ МПа [5]}, \quad (1.3)$$

$$\text{НВ} = 55 + 11 \varepsilon \%^{0,44} \text{ [5]}. \quad (1.4)$$

Для меди марки М1:

$$\sigma_{\text{в}} = 250 + 15 \varepsilon \%^{0,58}, \text{ МПа [5]}. \quad (1.5)$$

Для меди марки М4:

$$\sigma_{0,2} = 80 + 46 \varepsilon^{0,45} [5], \quad (1.6)$$

$$\sigma_{0,2} = 80 + 297 \varepsilon^{0,34}, \text{ МПа} [5]; \quad (1.7)$$

Обычно принято положение, в соответствии с которым в процессах холодной деформации сопротивление деформации не является функцией температуры.

1.1.3 Легирование кислородом технической меди

Влияние примесей на электропроводность кислородсодержащей меди отличается от той же закономерности бескислородной меди, так как многие элементы-примеси образуют с кислородом оксиды. Оксиды оказывают меньшее влияние на электропроводность, чем соответствующие элементы, находящиеся в твердом растворе. Если в кислородсодержащей меди находится избыточное количество примеси, которая полностью не окисляется, то ее влияние следует рассматривать как влияние двух составляющих: оксида и чистого элемента [6]. Медь намеренно легируют кислородом, который действует в качестве раскислителя растворенных в меди водорода и серы с образованием H_2O и SO_2 в расплаве. В последствие вредные примеси могут быть сведены к нулю, когда они оказываются связанными в нерастворимые оксиды. Если контролировать содержание кислорода, то образующиеся микроскопические пузырьки будут скомпенсированы в идеальных условиях примерно 4 % объемной усадки, связанной с переходом из жидкого в твердое состояние. Если поры не слишком велики, они полностью устраняются во время горячей прокатки [1]. По данным статьи [7] при повышении содержания кислорода в меди ниже его предела растворимости происходит повышение сопротивления деформации. При этом при превышении предела растворимости сопротивление деформации резко увеличивается. Это говорит о большой роли выделений оксидов кислорода в упрочнении металла. В статье [8] подтверждается, что частицы оксида меди увеличивают скорость генерации дислокаций и, следовательно, скорость зарождения центров рекристаллизации, что в целом тормозит рост зерен. Результаты металлографического исследования, приведенные в статье [9], показывают на наличие не только частиц оксидов в меди, но и сопутствующих их наличием аномалий в структуре металла. В статье [10] определены пределы растворимости некоторых сопутствующих примесей в меди, а также уточнены пределы растворимости кислорода при температурах, характерных для условий горячей деформации. Несмотря на наличие довольно большого количества работ, направленных на изучение взаимного влияния меди и кислорода, механизмы взаимодействия этих компонентов проводников тока на стадии их изготовления в производственных процессах остаются мало изученными. Попытка выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния при волочении медной проволоки с включениями сделана в статье [11], но в ней южнокорейские авторы сделали упор только на определение характеристик поврежденности. Японские авторы [12] рассчитывали влияние больших включений в меди, имеющих поперечный размер 20 % и выше от диаметра

проволоки. Такие размеры не являются характерными для включений оксидов меди. В статье [13] описано появление в медной проволоке при волочении пустот, что было объяснено авторами как проявление эффекта «медного дождя». При отливке заготовки поток бескислородной меди способен захватывать очень мелкие фрагменты шлака, этот шлак обволакивает частицы меди, образуя оболочки, и в таком виде металл кристаллизуется (как капельки дождя). Авторы доказали наличие таких оболочек методами трансмиссионной электронной микроскопии. Частицы меди в твердой оболочке, оказавшись внутри металла, образуют подобие твердых частиц оксида меди в кислородсодержащей меди. Вблизи частиц по направлению волочения при больших суммарных обжатиях вырастают поры. Зарождение несплошностей, типа пор, сопровождается снятием локальных напряжений и может быть основным релаксационным процессом, который необходим для продолжения пластической деформации. Однако, образование и развитие пор может привести к исчерпанию ресурса работоспособности, ухудшению упругих и физических свойств материалов, а также, уменьшая эффективное поперечное сечение и создавая дополнительные концентраторы напряжений, поры способствуют снижению прочности [14]. Авторы [15] установили, что в образцах меди, содержащих включения SiO_2 и CuO_2 и испытанных в режиме ползучести, поры всегда зарождаются рядом с частицами по одну сторону от них. Как отмечается в [16] зарождение несплошностей около недеформируемых частиц может происходить из-за образования около частиц скоплений дислокаций и деформационного упрочнения с релаксацией напряжений при образовании около границ несплошностей. Процессы залечивания и роста поры могут протекать одновременно с изменением ее формы. Так в результате изотермического нагрева удлиненные, преимущественно ориентированные поры в текстурированном поликристалле приобретают более равноосную форму. Но существует основной барьер, противодействующий полному залечиванию пор, это энергетически невыгодный отрыв их от границ, и в тех случаях, когда энергия межзеренных границ высока (двугранные углы не превышают 120°), спекание может прекратиться при установлении локального равновесия между поверхностной и зернограничной энергиями. С этим связано торможение порами движения межзеренных границ, в особенности на последней стадии рекристаллизации [14].

1.2 Влияние микроструктуры медной катанки на ее механические свойства

При деформации металлов прокаткой напряженное состояние отвечает трехосному сжатию с неравными величинами главных напряжений вдоль трех осей. Известно, что при прокатке металлов с решеткой того или иного типа получается определенный набор стабильных и нестабильных ориентировок. В ранних работах текстура холоднокатаной меди описывалась как совокупность

идеальных ориентировок $\{110\}\langle 112\rangle$ и $\{112\}\langle 111\rangle$. Позднее предлагалось описывать текстуру одной идеальной ориентировкой $\{358\}\langle 523\rangle$, двумя ориентировками $\{110\}\langle 112\rangle$, $\{358\}\langle 523\rangle$ или $\{123\}\langle 412\rangle$ и $\{146\}\langle 211\rangle$, ориентировкой $\{112\}\langle 111\rangle$ и четырьмя другими со сложными индексами или, наконец, двумя текстурами с центрами рассеяния около ориентаций $\{110\}\langle 112\rangle$ и $\{112\}\langle 111\rangle$ [21]. В литературе [18] показано, что с увеличением степени деформации в меди происходит обострение основных компонент текстуры прокатки $\{135\}\langle 211\rangle$; $\{112\}\langle 111\rangle$; и $\{011\}\langle 211\rangle$.

Как известно, целью проведения рекристаллизационного отжига является восстановление пластических характеристик металла и его разупрочнение. Разупрочнение меди при отжиге происходит при температурах выше 150 °С, а рекристаллизация начинается при 200...230 °С, что соответствует 0,35...0,37 от ее температуры плавления по абсолютной шкале, однако в производственных условиях температуры повышают до 500...600 °С для сокращения времени процесса и гарантии его завершения. Отмечается, что при наличии высоких степеней деформации удается снизить температуру рекристаллизации до 175 °С [17]. Таким образом, применение высоких степеней нагартовки при обработке давлением позволяет выйти на такие температурные режимы отжига, при которых не происходит значимого окисления поверхности изделия. На последних стадиях деформации меди протекают спонтанная полигонизация и рекристаллизация. При наличии в меди включений, например, закиси меди, ее деформирование сопровождается большей неоднородностью, в связи с этим разупрочнение наблюдается раньше [19]. В результате рекристаллизации волокнистая структура сменяется полиэдрической с большим числом двойников отжига [17]. Обычно отмечается, что определенная текстура деформации преобразуется в соответствующую текстуру рекристаллизации при отжиге. Считается, что у чистого материала (> 99.94%) с ГЦК решеткой после волочения в сердцевине проволоки сохраняется текстура деформации и несколько усиливается компонента $\langle 100\rangle$ [20]. Однако все еще невозможно точно предсказать текстуру отжига новой или неизвестной текстуры деформации. Причина этой неуверенности находится в нехватке знаний о важных микроструктурных деталях деформированного состояния и о процессе рекристаллизации вообще. Незначительные детали деформированного состояния могут стать важными факторами во время рекристаллизации, поскольку эта неоднородность может служить участками образования зародышей рекристаллизации.

1.3 Производство медной катанки

1.3.1 Общая информация об АО "Уралэлектромедь"

Российское предприятие по электролитическому рафинированию меди и продукции из нее. Крупнейший производитель высококачественных медных

катодов марки M00k, зарегистрированных на Лондонской бирже металлов (LME) под брендами UMMC и UMMC II и имеющих статус «Good Delivery» («надежная поставка»).

Помимо этого предприятие выпускает золото и серебро в слитках, медные электролитические порошки и изделия на их основе, медный купорос, никель сернокислый, селен, теллур, концентрат металлов платиновой группы, свинец марок C0 и C1, оказывает услуги горячего цинкования.

С 1999 года входит в состав Уральской горно-металлургической компании (УГМК).

В составе предприятия работают два филиала: «Производство полиметаллов» (г. Кировград), «Производство сплавов цветных металлов» (пос. Верх-Нейвинский).

Основные направления технической политики – развитие сырьевой базы, реконструкция производственных мощностей, совершенствование технологических процессов.

Штаб-квартира расположена в городе Верхняя Пышма Свердловской области.

Поставка продукции осуществляется в 50 субъектов Российской Федерации, в 11 стран ближнего и 42 страны дальнего зарубежья.

Предприятие осуществляет полный производственный цикл: от переработки черновой меди и лома до выпуска продуктов из меди.

На предприятии числится более 8 тысяч работников.

АО «Уралэлектромедь» основано на базе Пышминского медеэлектролитного завода, пущенного в 1934 году. Первые аноды получены 3 августа, катодная медь – 26 августа 1934 года.

В 1997 году пущен участок аффинажа золотых и серебряных слитков.

В 1999 году начато производство медной катанки.

В 2004 году Уралэлектромедь стала первым металлургическим предприятием России, получившим статус признанного мирового производителя «Good Delivery» Лондонской биржи драгоценных металлов (LBMA) по производству серебра, в 2006 году – по производству золота.

2010 год – катодная медь зарегистрирована на Лондонской бирже металлов (LME).

2012 год – ввод в эксплуатацию первой очереди нового цеха электролиза меди мощностью 160 тыс. тонн катодной меди в год.

2018 год - запущена в эксплуатацию вторая очередь цеха электролиза меди, работающая по бесосновной технологии. Ведется подготовка площадки под строительство третьей очереди цеха.

2019 год - запуск в эксплуатацию Производства стальных конструкций.[22]

1.3.2 Производство медной катанки

Основное оборудование литейно-прокатного агрегат и схема технологического процесса

Состав основного оборудования ЛПА показан на рисунке 1.3. Ниже дано краткое описание оборудования и технологии.

Промежуточный склад. В цехе расположен промежуточный склад для хранения катодной меди перед подачей ее к подъемнику печи. Площадь складирования составляет 1300 м². Дополнительный запас катодов может храниться непосредственно в цехе электролиза меди.

Скиповый подъемник. Наклонный скиповый подъемник предназначен для загрузки шихты в плавильную печь. Для загрузки собственного возвратного медьсодержащего сырья используются специальные контейнеры. С помощью лебедки заполненная катодами корзина по наклонным направляющим поднимается на высоту завалочного окна плавильной печи. Для подъема корзины используется канат диаметром 20 мм, максимальная нагрузка на разрыв 1960 Н/мм² со стальным сердечником, расчетная длина каната 86 м.

Плавильная шахтная печь «Асарко». Шахтная печь «Асарко» для плавки шихты представляет собой стальной цилиндрический кожух, футерованный огнеупорным кирпичом. В нижней части печи в четыре ряда установлены горелки, работающие на природном газе, и летка для непрерывного выпуска жидкой меди.

Смешение природного газа с воздухом и сжигание смеси производится в горелках с контролируемым соотношением «газ-воздух». Отвод печных газов производится в атмосферу через дымовую трубу. Короткое пламя, характерное для используемых горелок, система управления и контроля за процессом горения, предупреждают окисление расплавленной меди.

Соединительный желоб. По соединительному желобу жидкая медь передается от плавильной печи в миксер. Соединительный желоб имеет наклон и выложен огнеупорной футеровкой. Во избежание высоких потерь вследствие теплоизлучения весь желоб перекрыт огнеупорным кирпичом.

Соединительный желоб обогревается одиннадцатью горелками. Природный газ подается на горелки по четырем зонам. В каждой зоне производится отдельный анализ газовой смеси. Соединительный желоб имеет изгиб под углом 45 градусов, что дает возможность вести наблюдение за состоянием летки печи. В середине соединительного желоба располагается шлакоприемник для задержки шлака в затворе. С помощью металлической ложки шлак снимается в шлаковую чашу.

Печь-миксер. Из плавильной печи металл стекает по желобу в печь-миксер. Печь-миксер обеспечивает:

- контроль температуры меди;
- гомогенизацию расплава меди;
- отделение шлака путем сифонной разливки.

Миксер представляет собой оснащенную одной газовой горелкой цилиндрическую печь горизонтальной компоновки.

Конструкция миксера обеспечивает легкое удаление шлака. Печь снабжена системой сифонной разливки во избежание попадания шлака в систему управления потоком металла литейной машины.

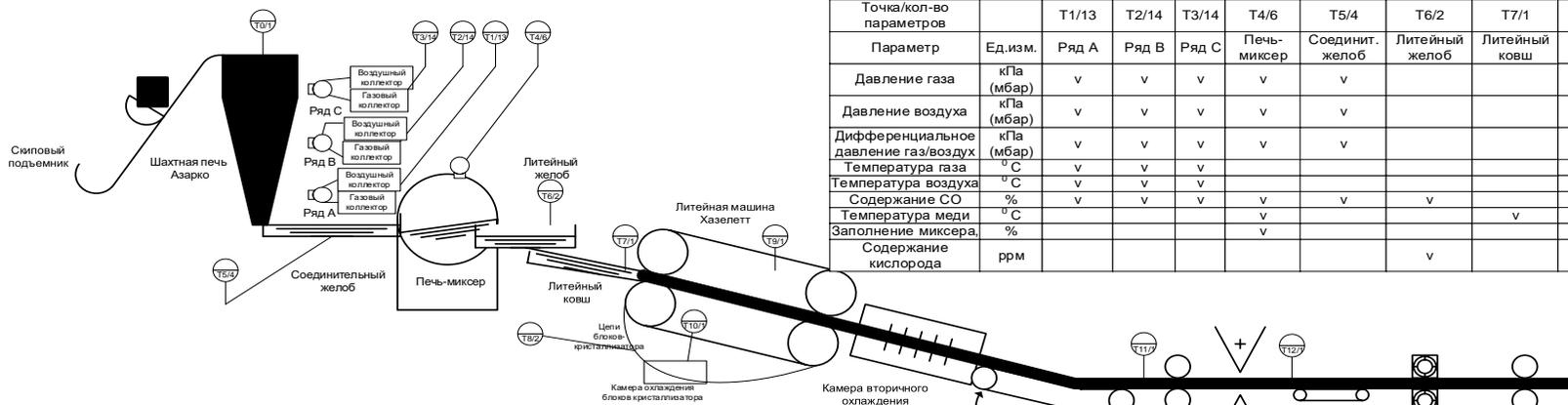


Таблица Н1- Параметры процесса плавнения и транспортировки металла

Точка/кол-во параметров		T1/13	T2/14	T3/14	T4/6	T5/4	T6/2	T7/1	T0/1
Параметр	Ед.изм.	Ряд А	Ряд В	Ряд С	Печь-миксер	Соединит. желоб	Литейный желоб	Литейный ковш	Верх печи,
Давление газа	кПа (мбар)	v	v	v	v	v			
Давление воздуха	кПа (мбар)	v	v	v	v	v			
Дифференциальное давление газ/воздух	кПа (мбар)	v	v	v	v	v			
Температура газа	°С	v	v	v					v
Температура воздуха	°С	v	v	v					
Содержание СО	%	v	v	v	v	v		v	
Температура меди	°С							v	
Заполнение миксера	%				v				
Содержание кислорода	ppm						v		

Таблица Н2-Параметры процесса литья заготовки

Точка/кол-во параметров		T8/2	T9/1	T10/1	T11/1
Параметр	Ед.изм.	Блоки-кристаллизатора	Оборотная вода	Химочищенная вода	Заготовка перед трайб-аппартом №1
Температура	°С	v	v	v	v
Давление	МПа (бар)		v	v	

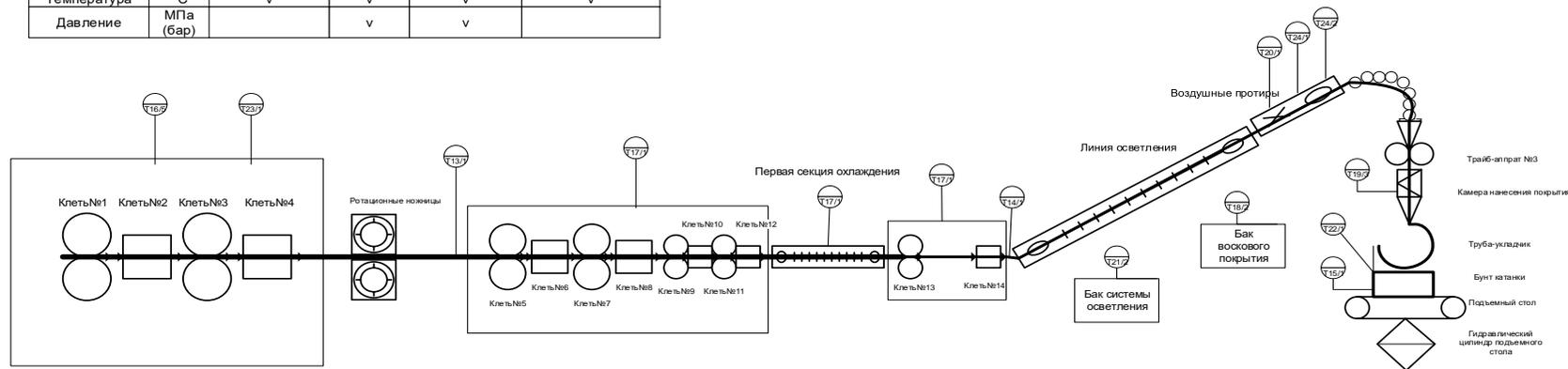


Таблица Н3- Параметры процесса прокатки заготовки

Точка/кол-во параметров		T12/1	T13/1	T14/1	T15/1	T16/5	T17/1	T18/2	T19/3	T20/1	T21/2	T22/1	T23/1	T24/1	T24/2
Параметр	Ед.изм.	Заготовка перед фрезагрегатом	Заготовка перед клетью №5	Заготовка после клетки №14	Катанка на бунтоукладчике	Эмульсия системы №1	Эмульсия системы №2	Восковое покрытие	Воздух для распыления воскового покрытия	Воздух на воздушных протирках линии освещения	Осветлитель	Катанка	Насос высокого давления	Инигибитор	Воздух воздушных протиров системы ингибиторов
Температура	°С	v	v	v	v	v	v	v			v				
Давление	МПа (бар)					v	v		v	v	v		v		v
Диаметр	мм											v			

Рисунок 1.3 - Схема расположения оборудования ЛПА [23]

Литейный желоб. Расплавленный металл вытекает из качающейся печи-миксера в литейный желоб. Желоб изготовлен из чугуна, футерованного огнеупорным кирпичами из карбида кремния.

Регулирование потока меди осуществляется путем большего или меньшего закрытия выпускного отверстия стопором. Этот стопор, покрытый графитовой смазкой, изготовленный из холоднотянутой высокохромистой стали и карбида кремния, входит в выпускное отверстие, Регулировка стопора осуществляется гидравлически с пульта управления в кабине литейной машины.

Литейный ковш. Литейный ковш изготовлен из стали, футерован набивной огнеупорной массой или карбидокремниевым кирпичом. Через литейный ковш подается металл в литейную машину. При опрокидывании литейного ковша назад медь перестает течь в литейную машину. Под литейным ковшем находится чаша для слива, оставшегося в ковше и желобе металла.

Литейная машина «Хазелетт». Схема литейной машины показана на рисунке 1.4, а ее техническая характеристика приведена в таблице 1.1.

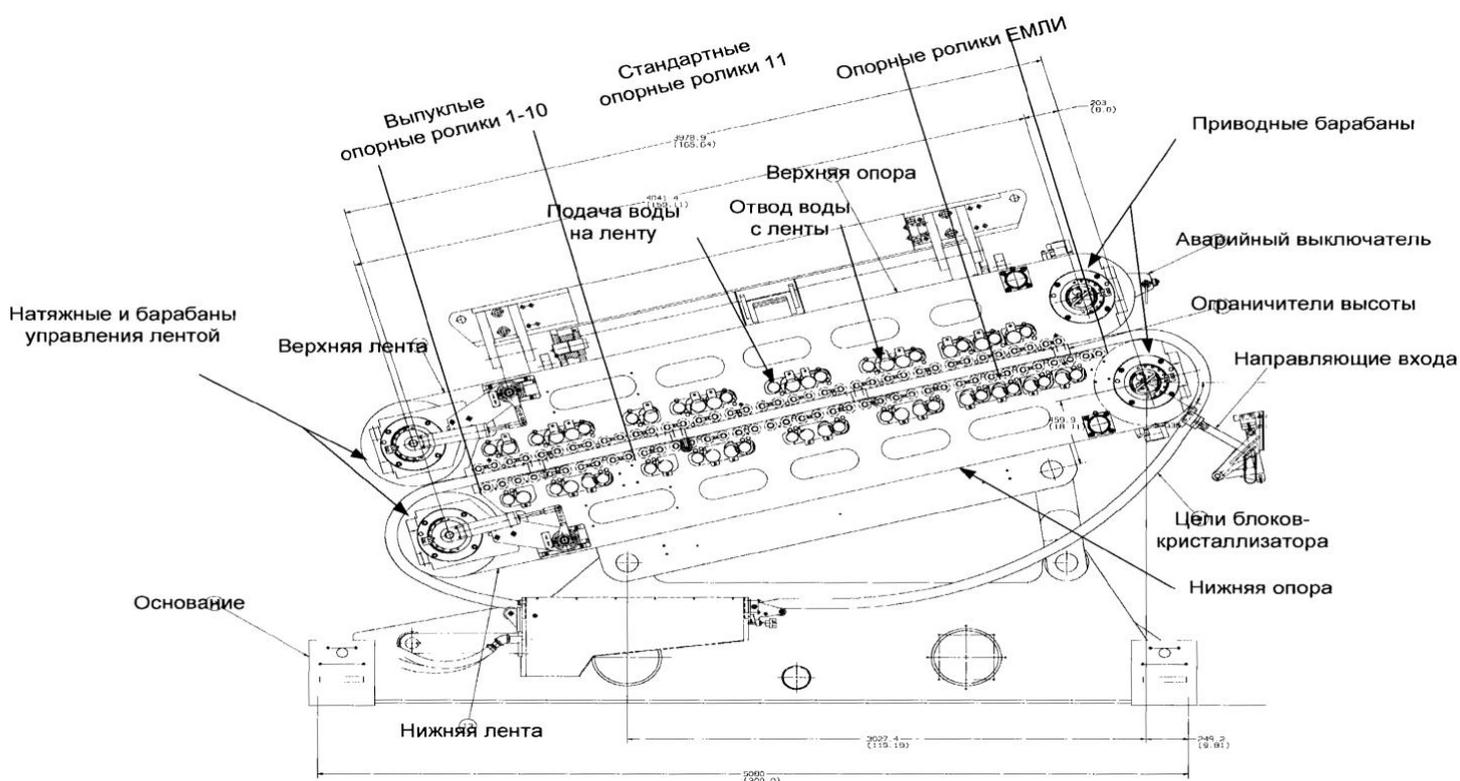


Рисунок 1.4 Основные узлы и механизмы литейной машины Хазелетт [23]

Литейная машина «Хазелетт» представляет собой двухленточную литейную машину, предназначенную для литья медной заготовки сечением 70 * 120 мм.

Кристаллизатор при двух ленточной машине «Хазелетт» имеет прямую симметричную прямоугольную форму. Соответствующая отлитая заготовка показывает аналогичные признаки, т. е. она отличается так, как она затем будет прокатываться, а именно, прямой, симметричной и прямоугольной. Симметричное поперечное сечение позволяет получить равномерную деформацию отлитой заготовки.

По данным фирмы «MANNESMANN DEMAG SACK» типичным для метода «Контирод» является получение симметричного прямоугольного сечения заготовки 120 * 70мм. Большое поперечное сечение обуславливает высокую степень деформации, а с нею и улучшенное качество, обеспечивает за счет полного преобразования внутренней структуры непрерывно литого металла в полную однородную структуру материала после прокатки.

Литейные ленты изготовлены из специальной стали. Размеры: ширина 508 мм, толщина 1,2 мм длина лент: верхняя опора (короткая) 10000 мм, нижняя опора (длинная) 10330 мм.

Таблица 1.1 Технические характеристики литейной машины «Хазелетт» [23]

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
Масса машины	кг	50800
Угол литья	градус	15
Толщина заготовки	мм	70
Ширина заготовки:		
- номинальная	мм	120
- максимальная	мм	130
Скорость литья:		
- номинальная	м/с	11,0
- максимальная	м/с	11,5
Производительность:		
- номинальная	т/ч	45
- максимальная	т/ч	50
Длина кристаллизатора	мм	3708

Продолжение таблицы 1.1

Длина		
- верхней ленты	мм	10000
- нижней ленты	мм	10330
Ширина ленты	мм	508
Толщина ленты	мм	1,12
Длина кристаллизатора	мм	3708
Длина		
- верхней ленты	мм	10000
- нижней ленты	мм	10330
Ширина ленты	мм	508
Толщина ленты	мм	1,12
Тип материала блоков кристаллизатора	Бронза Корзона или аналог	
Покрытие на ленты/блоки	Масло/графит	
Давление воды в коллекторе	МПа (бар)	0,56 (5,6)
Расход охлаждающей воды	дм ³ /мин	10 030
Давление воды для охлаждения блоков	МПа (бар)	0,4 (4)
Расход охлаждающей воды для блоков	дм ³ /мин	950
Давление воды в камере вторичного охлаждения	МПа (бар)	0,49 (4,9)
Расход воды в камере вторичного охлаждения	дм ³ /мин	2 650
Общий расход воды	дм ³ /мин	13 630
Диапазон скоростей машины	м/мин	0-16,45

Прямолинейная разливка исключает трещинообразование на поверхности меди, подверженной тепловой хрупкости, так что в металл не может попадать кислород воздуха. Тепловая хрупкость меди возрастает с увеличением степени загрязненности сырьевого материала меди. Вследствие прямолинейности без изгиба, что исключает поверхностное трещинообразование, можно на установках «Контирод» разливать и прокатывать достаточно загрязненные катоды, получая проволоку достаточно хорошего качества.

Трайб-аппарат №1. Медные или стальные тянущие валки №1 расположены между изгибающим рольгангом и маятниковыми ножницами. С помощью них регулируются скорости приводов прокатного стана. Диаметр валков от 320 до 310 мм. Привод роликов осуществляется с помощью двигателя переменного тока.

Маятниковые ножницы и поворотный стол. Маятниковые ножницы расположены между тянущими валками №1 и подъемным столом. С помощью маятниковых ножниц литая заготовка режется на отрезки длиной примерно 77 см. Технические характеристики маятниковых ножниц приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Технические характеристики маятниковых ножниц и поворотного стола [23]

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение
1 Размер медной заготовки	мм	120x70
2 Минимальная температура заготовки	°С	до 860
3 Гидравлический рабочий цилиндр:		
- диаметр поршня	мм	280
- диаметр штока поршня	мм	200
- ход	мм	125
- рабочее давление	МПа (бар)	22 (220)

Ножи и ролики ножниц охлаждаются эмульсией. Фрезагрегат. Он предназначен для фрезерования четырех сторон литейной заготовки двумя парами фрез, вращающихся по направлению движения прутка. Фаски снимаются для исключения закатки заусенец или острых углов внутрь прутка, что приводит к дефектам катанки. Фрезы охлаждаются эмульсией.

Фаска, снятая с заготовки (стружка) смывается эмульсией в сборный контейнер, расположенный под фрезагрегатом и удаляется при помощи шнекового транспортера стружки, который выгребает стружку из сборного контейнера и

засыпает в пресс для стружки, металлический контейнер или деревянный ящик, расположенный на отметке 0,000.

Пресс для стружки формируют из фрезерованной стружки плотные брикеты, которые можно использовать в качестве собственного возвратного сырья в печь.

Прокатный стан.

Общие положения. Прокатный стан предназначен для получения из литой заготовки сечением 120 * 70 мм медной катанки диаметром 8 мм и включает в себя:

- черновые клетки № 1-4;
- ротационные ножницы;
- предчистовые клетки № 5-12;
- первая секция охлаждения;
- петлеопускатель № 2;
- чистовая клеть № 13;
- петлеопускатель № 3;
- чистовая клеть № 14.

Чередуются горизонтальные и вертикальные проходы: нечетные номера – горизонтальные проходы; четные – вертикальные. Первые четыре черновые клетки имеют диаметр валков 480 мм, предчистовые клетки имеют диаметр валков 340 и 195 мм, а в чистовых клетях - 195 мм.

Черновая группа клеток № 1-4. Клетки имеют соединительные трубопроводы для эмульсии, масла и сжатого воздуха. На подводящих трубопроводах для эмульсии у каждой клетки установлены вентиль и манометр для регулирования охлаждения валков.

Клетки представляют собой кассетную конструкцию с консольно установленными в подшипниках кольцевыми прокатными валками, между которыми осуществляется деформация металла.

Для настройки межвалкового расстояния используется эксцентриковая втулка, установленная в корпусе клетки. Эксцентриковая втулка поворачивается с помощью центрального червячного вала, так что прокатные валки перемещаются симметрично по отношению к оси прокатки.

Привод вертикальных клеток осуществляется снизу. Двигатель и редуктор соединены с прокатной клетью универсальными шпинделями с зубчатой муфтой на срезных штифтах. Клетки и редукторы присоединены к центральной системе жидкой смазки.

При износе калибра прокатные валки могут перетачиваться до 10% от номинального диаметра. В корпусах клеток предусмотрена система распыления масловоздушной смеси для предотвращения коррозии. На передней стороне клеток расположены обработанные поверхности для крепления вводной и выводной проводковой арматуры. Клетки 1 и 2 имеют индивидуальные приводы от двигателя переменного тока. Клетки 3 и 4 имеют индивидуальные приводы от двигателя постоянного тока.

Технические характеристики двигателей черновых клеток приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Технические характеристики двигателей черновых клетей [23]

Номер клетки	Номинальный ток, А	Номинальное число оборотов, об/мин	Номинальная мощность, кВт
1-2	198	1500	93
3-4	642	1755	247

Предчистовые клетки № 5-12 (прокатный блок). Группа предчистовых клетей № 5-12 состоит из четырех клетей с диаметром валков 340 мм (клетей №5-8) и четырех клетей с диаметром валков 195 мм (клетей № 9-12). Клетей имеют защитный кожух и трубопроводы для эмульсии, масла и воздуха.

Клетей имеют групповой привод от асинхронного двигателя через раздаточную коробку, которая распределяет крутящий момент отдельно на линию горизонтально установленных клетей № 5,7,9,11 и на линию вертикально установленных клетей № 6,8,10,12. Техническая характеристика двигателя приведена в таблице 1.4.

Межвалковый зазор регулируется с помощью эксцентриковых втулок на каждой клетей.

Таблица 1.4 Технические характеристики двигателя предчистовых клетей [23]

Номер клетки	Номинальный ток, А	Номинальное число оборотов, об/мин	Номинальная мощность, кВт
5-12	2*760	985	1520

Чистовая группа клетей № 13-14. В эту группу входят две клетей: горизонтальная и вертикальная, имеющие индивидуальный привод от двигателя постоянного тока. Конструкция клетей, система смазки и охлаждения такие же, как у клетей 9-12. Техническая характеристика двигателей клетей 13 и 14 приведена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 Технические характеристики двигателей клетей 13, 14 [23]

Номер клетки	Номинальный ток, А	Номинальное число оборотов, об/мин	Номинальная мощность, кВт
13-14	625	2500	230

Петлеопускатели № 2,3 перед чистовыми клетями. На петлеопускателях образуется вертикальная петля вниз. Благодаря петле в клетях 13 и 14 может производиться прокатка без натяжения, и за счет этого получается катанка с хорошей размерностью. Петли регистрируются и управляются с помощью датчиков – измерителей петли.

Ротационные ножницы. Ножницы расположены перед клетью №5 прокатного стана. Назначение ротационных ножниц состоит в том, чтобы при возникновении помехи за черновой группой клетей разрезать прокатную заготовку и предотвратить поступление проката в последующие клетки. Одновременно с ротационными ножницами включаются маятниковые ножницы.

Техническая характеристика ротационных ножниц:

- диаметр разрезаемой заготовки 40 мм;
- мощность двигателя 51 кВт;
- частота вращения до 1500 мин^{-1}
- передаточное отношение $i=23,6$.

Отклоняющая направляющая. Отклоняющая направляющая расположена в кожухе клетки № 14. С помощью отклоняющей направляющей катанка передается из клетки № 14 в линию осветления и охлаждения. Устройство представляет собой изогнутую, разделенную в продольном направлении на две части направляющую.

Первая секция охлаждения. Участок охлаждения расположен перед клетью № 13. Секция охлаждения позволяет регулировать конечную температуру прокатки катанки в целях улучшения ее физических свойств. Секция охлаждения в зависимости от скорости прокатки позволяет охладить прокат примерно до $50-60 \text{ }^\circ\text{C}$. Участок охлаждения является закрытой системой охлаждения, состоящей из коробчатых холодильников и короба, охлаждающих трубок и соединительных трубопроводов. Кроме того, в последней секции короба находится протир для удаления охлаждающей жидкости сжатым воздухом. В качестве охлаждающей жидкости используется эмульсия прокатных клетей.

Эмульсионная система прокатного стана. Эмульсионная система прокатного стана предназначена для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (далее - эмульсия) к оборудованию от маятниковых ножниц до клетки № 14 с целью охлаждения и смазки прокатных валков, а так же осветления (удаления медной окалины с поверхности) медной заготовки в процессе прокатки.

Линия осветления и охлаждения. Общие положения. Линия осветления и охлаждения катанки расположена между 14 клетью и виткоукладчиком. В линии осветления и охлаждения производится восстановление оксида меди на поверхности медной катанки с одновременным охлаждением. Линия осветления и охлаждения начинается со сливного короба, снабженного механическим очищающим протиром. Протир должен предотвратить перенос жидкости осветлителя с линии осветления к прокатным клетям. Расположенная далее первая секция осветлителя оснащена восемью трубами для подачи осветлителя, за каждой из которых находится один сливной короб. Сливные короба снабжены очищающими соплами, которые выполнены в виде кольцевых сопел, через которые также подается осветлитель. В конце линии осветления находится секция сушки

катанки. Сушка катанки производится с помощью воздушных протиров, а также с помощью расположенных перед ними механических очищающих протиров. Включение системных насосов и подача сжатого воздуха для воздушных протиров происходит через магнитный клапан, который открывается, когда медная катанка доходит до клетки № 13.

Сборный бак. Основная функция сборного бака заключается в сборе рабочей среды, поступающей по сливным трубопроводам. На сборном баке установлен регулятор уровня, который имеет четыре контакта. Первый контакт сверху дает сигнал «превышение уровня» и одновременно сигнал тревоги. Второй контакт дает сообщение «пополнение охлаждающей жидкости закончить». Третий контакт дает сообщение «минимальный уровень - начать процесс пополнения» и одновременно сигнал тревоги. Четвертый контакт дает сообщение «уровень минимальный-минимальный» с одновременным отключением системных насосов.

Система освещения. Система освещения предназначена для подачи осветителя в линию освещения и охлаждения.

Установленная в сборном баке сетка задерживает грубые загрязнения. Вентиляционные фильтры обеспечивают постоянное вентилирование сборного и смесительного бака и препятствуют образованию в них вакуума при работе насосов.

Системные насосы. С помощью трех циркуляционных насосов (один служит в качестве резервного) среда подается на линию освещения. Включение насосов возможно только в случае, если уровень в сборном баке выше уровня контакта «мин.». Насосы автоматически отключаются, если уровень в сборном баке опускается ниже уровня контакта «мин-мин».

Пластинчатый теплообменник. Пластинчатый теплообменник вместе со станцией регулирования температуры, обеспечивает постоянную температуру подачи не более 40 °С. Регулятор температуры регистрирует фактическое значение, и в соответствии с этим регулирует поток охлаждающей воды. Задание температуры осветителя на регуляторе 38 °С.

Система контроля. Контактный манометр контролирует давление в системе. Первый контакт дает сигнал о высоком давлении, второй контакт дает сигнал о низком давлении. Контактный термометр с двумя контактами дает сообщения «минимальная температура», «максимальная температура».

Установка по нанесению ингибитора коррозии. Установка нанесения ингибитора предназначена для получения раствора ингибитора коррозии бензотриазола (БТА) и обработки полученным раствором медной катанки. Использование ингибитора коррозии БТА повышает коррозионную стойкость катанки, что позволяет транспортировать ее в страны с повышенной температурой и влажностью.

Технологический процесс нанесения ингибитора коррозии на медную катанку состоит из следующих технологических стадий:

- заполнение реактора деионизованной водой;
- загрузка сухого порошка БТА в реактор;
- продувка трубопроводов подачи спирта и мерника углекислым газом;
- заполнение спиртом мерника;

- продувка трубопроводов подачи спирта углекислым газом;
- подача спирта из мерника в реактор;
- циркуляция раствора ингибитора коррозии БГА;
- фильтрация спиртового раствора ингибитора коррозии;
- подача спиртового раствора ингибитора коррозии на поверхность катанки.

Система управления подачи изопропилового спирта в системы. Система предназначена для подачи изопропилового спирта из подземного резервуара (склада) последовательно в баки системы эмульсии, осветления и ингибитора с целью поддержания необходимой технологической концентрации изопропилового спирта в этих системах. Общее количество хранящегося изопропилового спирта составляет 40 м³ (32 т). В качестве резервуара для хранения изопропилового спирта принята горизонтальная цилиндрическая стальная эмалированная емкость объемом 50 м³. Завоз спирта осуществляется автотранспортом (цистерна топливозаправщика объемом 14,6 м³). Добавка изопропилового спирта осуществляется с помощью системы подачи изопропилового спирта со склада хранения их емкости для хранения.

При подаче спирта в любой из эмульсионных баков вышеуказанные операции выполняются в той же последовательности.

Система улавливания паров изопропилового спирта. Установка предназначена для улавливания паров изопропилового спирта из воздушной смеси воздушных протиров линии осветления и системы нанесения ингибиторов коррозии.

Улавливание изопропилового спирта происходит при проходе воздуха, идущего с воздушных протиров линии осветления, через центробежно-барботажный аппарат двухступенчатой очистки ЦБА-0,5Т-2, в котором осуществляется насыщение жидкости изопропиловым спиртом (ИПС) из подаваемого воздуха.

Дефектомат. Дефектомат предназначен для классификации медной катанки по дефектам путем контроля поверхности медной катанки и включений железа в медной катанке неконтактным, неразрушающим вихретоковым методом. Система контроля дефектомата состоит из следующих элементов и устройств:

- блока контроля электроники;
- рабочего компьютера;
- программного обеспечения Defectotest;
- датчиков.

Намоточное устройство и рольганги. Изгибающий рольганг. Изгибающий рольганг расположен за линией осветления и охлаждения и перед тянущими валками №3. Назначение - перевод катанки из горизонтального направления движения в вертикальное. Первый ролик со стороны линии осветления является регулируемым и настраивается точно в соответствии с подъемом линии осветления.

Тянущие валки (трайб-аппарат) №3. Тянущие валки служат для подачи катанки в укладчик витков. Необходимую работу по транспортированию катанки

совершают профилированные валки. Привод осуществляется через зубчатые колеса непосредственно на валы фрикционных валков.

Система нанесения воскового покрытия. Система нанесения воскового покрытия расположена между тянущими валками и укладчиком витков. Система нанесения воскового покрытия предназначена для покрытия медной катанки защитным слоем, предотвращающим поверхность катанки от коррозии.

Температура подаваемого раствора на линию должна быть в диапазоне от 65 °С до 75 °С.

Укладчик витков. Укладчик витков расположен после станции нанесения воскового покрытия и перед устройством для формирования бунтов проволоки.

Укладчик витков состоит из редуктора укладчика витков со ступенчатой передачей, верхней направляющей для катанки, расположенной на корпусе укладчика витков и подвесной держатель трубы-укладчика, смонтированный на выходной части устройства под корпусом укладчика витков, с основным элементом в виде изогнутой трубы-укладчика.

Подаваемая тянущими валками катанка проходит вертикально через верхнюю направляющую в трубу-укладчик, смонтированную на вращающемся держателе. Катанка выходит из трубы-укладчика витков в виде витков, задаваемых формой трубы укладчика. Витки катанки падают в устройство для формирования бунтов.

Труба-укладчик вращается с постоянной или переменной скоростью в соответствии с заданной скоростью прокатного стана:

Сборник (ротационная камера) бунтов. Сборник бунтов расположен под укладчиком витков над столом для опускания бунтов станции для намотки бунтов.

Назначение сборника бунтов состоит в укладке розетками колец катанки, поступающих от укладчика витков со средним диаметром 1185-1200 мм, с помощью вращающегося кольцевого распределителя с эксцентрично расположенными отражателями. Кроме этого, сборник бунтов осуществляет функцию накопителя витков катанки, поступающих за то время, пока окончательно сформированный бунт выводится с данной позиции.

Устройство для опускания бунтов. Устройство для опускания бунтов состоит из подъемного стола, рольганга и расположенного между ними взвешивающего устройства.

Рольганг для готовых бунтов. Рольганг служит для транспортировки готовых бунтов катанки.

Привод роликов осуществляется с помощью электродвигателя. С помощью роликовой цепи осуществляется одновременный привод всех роликов. Роликовая цепь натягивается с помощью натяжного устройства.

Транспортный рольганг для поддонов. Транспортный рольганг подает пустые поддоны на стол для опускания бунтов.

Привод роликов осуществляется с помощью электродвигателя через отдельные цепи, расположенные попеременно с разных сторон рольганга.

Пресс для бунтов. Пресс для бунтов предназначен для прессования и обвязки поступающих бунтов медной катанки. Технические характеристики приведены в таблице 1.6.

При сохраняющемся усилии прессования в середину бунта с помощью гидравлического цилиндра вводится оправка, имеющая шесть вертикальных направляющих каналов. Поперечные направляющие для заправки ленты для обвязки сверху смонтированы на нижней плите пресса, а для обвязки снизу - в рольганге пресса.

Таблица 1.6 Технические характеристики пресса для бунтов [23]

Характеристика	Единицы измерения	Значение
1 Размеры бунта		
- диаметр:		
а) наружный	мм	1600
б) внутренний	мм	800
- высота	мм	1225
2 Масса бунта	кг	5000
3 Усилие прессования	кН	100
4 Рабочее давление	МПа (бар)	4 (40)
5 Устройство для обвязки	Ленты с пневматическими обвязочными машинками	
6 Размер стальной обвязочной ленты	мм	32 * 0,8
7 Размер полиэстровой обвязочной ленты	мм	19 * 1,27

С помощью пресса для бунтов бунт делается пригодным для транспортировки, т. е. он прессуется и обвязывается. Находящийся на поддоне бунт катанки с помощью рольганга пресса подается под пресс и фиксируется с помощью стопорного устройства. Обвязочная лента с катушки вручную вводится в направляющие, натягивается с помощью пневматической обвязочной машинки, скрепляется и обрезается.

Упаковка. Установка автоматической упаковки расположена за прессом №1 и предназначена для сжатия и автоматической обвязки бунтов катанки полиэстровыми лентами TENAX 2225 сечением 19,05x1,27 мм. Установка состоит из пресса №2 (аналогичная конструкция пресса №1), опорно-поворотного стола

рольганга со стопорами, двух обвязочных головок фирмы SIGNODE с пультами управления, двух датчиков и трех пультов управления.

Установка может работать в трех режимах:

- автоматический (все перемещения бунта и операции упаковки происходят автоматически, кроме опускания плиты пресса)

- полуавтоматический (опускание и поднятие плиты пресса, обвязка, поворот стола с шагом 90° и перемещение бунта на следующий рольганг происходит по командам оператора)

- ручной (полуавтоматический режим с добавлением функций заданного перемещения бунта по рольгангу поворотного стола и заданного угла поворота стола).

Склад готовой продукции. Хранение выдаваемой медной катанки предусматривается на промежуточном складе готовой продукции, размещенном в цехе. Хранение катанки осуществляется на поддонах штабелями в три яруса, фигурками в один ярус. Площадь хранилища катанки на промежуточном складе предусмотрена 1800 м², что соответствует 2-3-х суточному запасу. С промежуточного склада бунты катанки электропогрузчиками передаются на заводской склад готовой продукции.[23]

1.3.3 Линия освещения и охлаждения

Линия освещения и охлаждения катанки расположена между 14 клетью и виткоукладчиком. В линии освещения и охлаждения происходит восстановление оксида меди на поверхности медной катанки с одновременным охлаждением.

Линия освещения является закрытой системой. Она состоит из сборного бака, системных насосов, пластинчатого теплообменника, труб для подачи осветлителя, сливных коробов с сопловыми устройствами, а также направляющих и соединительных труб, которые привинчиваются к двойным трубным траверсам. Двойные трубные траверсы одновременно служат для подвода и слива осветлителя. Линия освещения начинается со сливного короба, снабженного механическим очищающим протиром. Протир должен предотвратить перенос осветлителя с линии освещения к прокатным клетям.

Технические характеристики системы освещения указаны в таблице 1.7.

Таблица 1.7 Технические характеристики системы освещения [23]

Характеристика	Единицы величины	Значение
1 Производительность	м ³ /ч	300
2 Подаваемая среда	водно-спиртовая смесь	

Продолжение таблицы 1.7

3 Давление подачи	МПа (бар)	0,5 (5)
4 Рабочая температура	°С	Не более 40
5 Объем сборного бака	м ³	30

С помощью трех циркуляционных насосов (один служит в качестве резервного) осветлитель из сборного бака через теплообменник подается на линию освещения. Включение насосов возможно только в случае, если уровень в сборном баке выше уровня контакта «мин.». Насосы автоматически отключаются, если уровень в сборном баке опускается ниже уровня контакта «мин-мин».

В автоматическом режиме работы запуск насосов производится, когда катанка достигает трайб-аппарата № 3.

Линия охлаждения состоит из четырех секций. Подача осветлителя для каждой секции регулируется с помощью задвижек с электроприводом.

В конце линии освещения находится секция сушки катанки. Сушка катанки производится с помощью механических и воздушных протиров. Каждый протир снабжен индивидуальным подводом сжатого воздуха. Подача сжатого воздуха для воздушных протиров происходит через электромагнитный клапан, который открывается, когда медная катанка доходит до клетки № 13. [23]

1.4. Постановка целей и задач исследования.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время медь является одним из наиболее используемых металлов, так как обладает высокими тепло- и электропроводностью, технологичностью, коррозионной стойкостью, прочностью и пластичностью. Наибольшим спросом пользуется электротехническая медь.

В технической литературе имеются данные о зависимости свойств меди от среднего размера зерна, но работ, выполненных на промышленных полуфабрикатах электротехнической меди довольно мало. В связи с этим целью работы явилось исследование влияния структурных параметров, таких как величина размера зерна, на комплекс механических свойств.

Исходя из этого, поставлены следующие задачи:

- исследовать структурное состояние катанки при различных технологических параметрах производства (разная настройка трайб-аппарата и скорости подачи охлаждающей эмульсии)
- исследовать комплекс механических свойств медной катанки
- проанализировать взаимосвязь структурных параметров медной катанки и механических свойств.

2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материал исследования

Объектом исследования в данной работе является медная катанка диаметром восемь миллиметров, она является готовой продукцией и выпускается в соответствии с ГОСТ Р 53803-2010, ASTM B49-20 и BS EN 1977-2013. Химический состав катанки соответствует требованиям ГОСТ 859-2001.

Полуфабрикаты были получены в промышленных условиях в Цеху производства медной катанки. Катанка получена методом CONTIROD из катодов марки M00к (ГОСТ 546-2001) производства ОАО «Уралэлектромедь». Содержание кислорода в меди различными нормативными документами ограничивается различными пределами, в исследованном металле это содержание составляло до 0,04 %. Химический состав исследуемых полуфабрикатов приведен в таблице 2.1.

В процессе CONTIROD в режиме горячей обработки давлением коэффициент вытяжки составляет 167, степень деформации (логарифмическая) равна 5,1, а накопленное относительное обжатие 99 %.

Таблица 2.1 Марочный состав меди M001 (ГОСТ Р 53803) [23]

Содержание химических элементов, масс. %											
Cu	Bi	Sb	As	Fe	Se	Te	Pb	S	O	Ag	P
не менее	Не более										
99,96	0,0002	0,0004	0,0005	0,001	0,0002	0,0002	0,0005	0,0015	0,04	0,0025	-

Катанка медная предназначена для производства электротехнических изделий и выпускается методом непрерывного литья и прокатки».

Гарантийный срок хранения - 3 месяца с даты изготовления.

Таблица 2.2 Физико-химические параметры [23]

Наименование параметров	КМ M001	КМ M0
Номинальный диаметр, мм	8,0	8,0
Отклонения от номинального диаметра, не более, мм	±0,4	±0,4
Окисленность поверхности, не более, ангстрем	1000	1000
Марка меди (ГОСТ Р 53803-2010)	M001	M0
Содержание кислорода, не более, ppm	400	400
Удельное электросопротивление, не более, Ом·м·10 ⁻⁶	0,01707	0,01718
Относительное удлинение, не менее, %	35	35
Число скручиваний в одну сторону до разрушения для катанки диаметром 8 мм, не менее	50	50

2.2 Методы исследования, оборудование, приборы

2.2.1 Препарирование образцов

2.2.1.1 Запрессовка

На циркулярном отрезном станке Mecatome TS255/300 образцы медной катанки были нарублены на 4 сечения, два параллельных и 2 перпендикулярных. Четыре полученных сечения как раз влезают в запрессованную форму (рисунок 2.2).

Для запрессовки использовалось оборудование MECAPRES C (рисунок 2.1). Запрессовка производится следующим образом: Пуансон поднимается, протирается ацетоном после предыдущего использования. Далее аккуратно выкладываются медные образцы исследуемой стороной на пуансон. Сначала заполняется тонким слоем будущей прозрачной иммерсионной средой (прессовальная смола), основная же часть будущей запрессованной формы заполняется черной иммерсионной средой. Инструмент закрывается, плотно завинчивается закрывающий механизм. Устанавливается давление 0,4 МПа, время нагрева 15 минут, время охлаждения 15 минут. Регулируя поток сжатого воздуха, упираем пуансон со всем образцом в винт которым вся эта конструкция закрывается и включаем прессование. После чего стравливаем сжатый воздух и достаём готовый образец.

В случае, если шайба останется сильно гранулированной, а не полностью однородной пластиковой массой, стоит вырезать образец заново и повторить процесс запрессовки, обращая очень пристальное внимание на уровень грубой смолы и высоту вырезанного образца.



Рисунок 2.1 Прессовальный аппарат MECAPRES C



Рисунок 2.2 Образцы зашлифованные (шайбы).

2.2.1.2 Шлифовка и полировка

Для дальнейшей обработки запрессовок им надо предать ровную поверхность, для этого используется шлифовально-полировальное устройство MEGAPOL P252 (рисунок 2.3) и наждачная бумага с зернистостью P150. Образец запрессованной «шайбы» помещаются в специальный держатель, далее, плотно держа рукой, держатель помещается на шлифовальный круг, включается вода для смягчения процесса и вымывания отходов и только после этого запускается вращение шлифовального круга.



Рисунок 2.3 Шлифовально-полировальное устройство MEGAPOL P252.

После того как была предана ровная поверхность образцу её надо сделать зеркально гладкой. Для этого используем метод последовательного полирования образца на шлифовально-полировальном станке STRUER RotoPol-1 (рисунок 2.4), автоматическом устройстве с вращающейся платой держателя образцов STRUER RotoForce-1 и автоматическом дозаторе STRUER Multidoser. От минимально до максимально-дисперсного полировального абразива (совокупность полировального круга, суспензии и жидкости охлаждения). Выбор диска шлифования, суспензии, лубриканта, скорости вращения, усилия прижатия шлифов и времени процесса описан в инструкции по эксплуатации.



Рисунок 2.4 Полировальная машина

2.2.1.3 Травление

Перед тем как изучать шлифы методом оптической микроскопии требуется их протравить. Основной принцип травления заключается в том, что зерна разных фаз, как и границы зёрен травятся с разной интенсивностью, а это позволяет пронаблюдать картину микрорельефа с помощью микроскопа.

Основная сложность травления заключается в подборе методики травления. Раствор травления может меняться в зависимости от материала, а также от термической и механической его обработки. И раствор, как и время травления нужно подбирать индивидуально. В данной работе процесс подбора раствора травления несколько упрощен из-за того, что изучалась чистая медь. Несколько потенциальных растворов для травления чистой меди представлены ниже.

Травление проводилось в вытяжном шкафу с применением средств индивидуальной защиты

Реактивы и способы травления меди, для выявления границ зерен после полировки:

Состав реактива №1:

- K_2CrO_7 – 2г

- H_2SO_4 – 8г

-NaCl (насыщенный раствор) – 4мл

- H_2O – 100мл

Протирают ватным тампоном до потускнения поверхности, промывают под струей воды и сушат фильтровальной бумагой.

Состав реактива №2:

- $(NH_4)_2S_2O_8$ – 10г

- H_2O – 100мл

Протирают тампоном, промывают под струей воды и просушивают фильтровальной бумагой. Примечание: снимают окрашивание зерен после травления реактивом №1.

Состав реактива №3:

- NH_4OH – 5мл

- H_2O – 5мл

- H_2O_2 (3%) – 2-5мл Перекись водорода

Протирают тампоном до легкого потускнения поверхности (~15-35 сек) промывают водой и сушат. Примечание: Раствор должен быть свежеприготовленный.

Состав реактива №4:

- $FeCl_3$ – 2-5г

-HCl – 10мл

- H_2O – 100мл

Протирают ватным тампоном до потускнения поверхности, промывают под струей воды и сушат фильтровальной бумагой. Примечание: может быть использован как самостоятельный травитель. Может быть использован после травления шлифа реактивом №1 – Обеспечивается резкое очертание границ.

Первым был протестирован реактив №3 из-за доступности ингредиентов. Он дал удовлетворительный для исследования результат.

По неизвестной причине катанка травилась им за разное количество времени (от 15 до 35 секунд в среднем) из-за этого часто шлифы были перетравлены и приходилось несколько раз перешлифовывать их на самом дисперсном

2.2.2. Механические испытания

2.2.2.1 Испытания на растяжения

Испытания на растяжение — это самый распространенный вид статических механических испытаний. Для полной характеристики механических свойств образцы растягиваются до разрушения на специальных, часто универсальных, испытательных машинах, основными узлами которых являются механизм передачи на образец растягивающего усилия и механизм измерения силы сопротивления образца деформации. В процессе испытания зависимость силы сопротивления деформации от величины абсолютного удлинения образца фиксируется в двухкоординатной системе: усилие P – удлинение Δl . Эта зависимость представляет собой результат испытания и называется первичной диаграммой растяжения (рисунок 2.6.) [24].

Определение механических свойств производится после испытания графическим методом по диаграмме растяжения, исходными материалами являются диаграмма растяжения.

Диаграмма растяжения позволяет определять: $\sigma_{\text{ПЦ}}$ – предел пропорциональности, σ_y – предел упругости, σ_m – предел текучести, σ_e – предел временного сопротивления или предел прочности. Прочностные свойства выражаются в условных напряжениях, рассчитанных по формуле (2.1) [24]:

$$\sigma = \frac{P_i}{F_0}, \text{ МПа} \quad (2.1)$$

где P_i – растягивающая нагрузка, Н; F_0 – площадь поперечного сечения до испытания, мм^2

Испытания проводились на разрывной машине TINIUS OLSEN T-СЕРИИ (рис. 2.7).

Во время этих испытаний измерялись:

- 1) Временное сопротивление.
- 2) Относительное удлинение
- 3) Условный предел текучести 0,2%, МПа
- 4) Диаметр шейки
- 5) Диаметр разорванного образца на расстоянии 15, 50 и 120 мм от места разрыва
- 6) Расстояния от шейки до краев измеряемой длины образца

Эти данные также были измерены для потенциального нахождения зависимостей между свойствами и структурой медной катанки.

Для измерения использовался ГОСТ [25]. Испытывались образцы 300 мм, из которых рабочей частью являлись центральные 200 мм

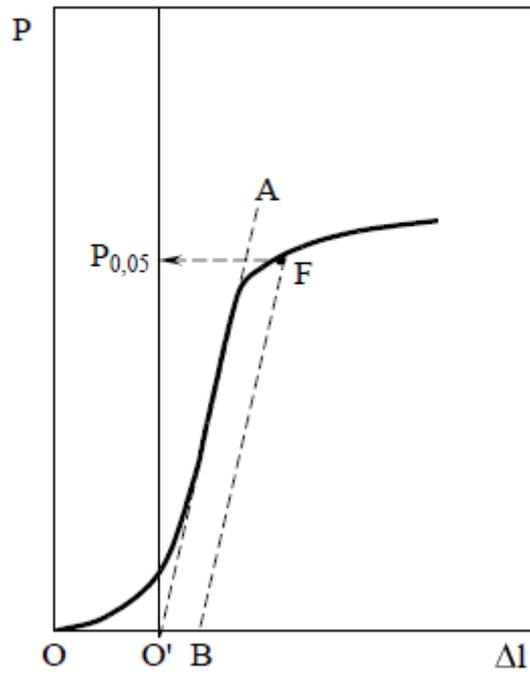


Рисунок 2.6 Графический способ определения предела упругости [24]

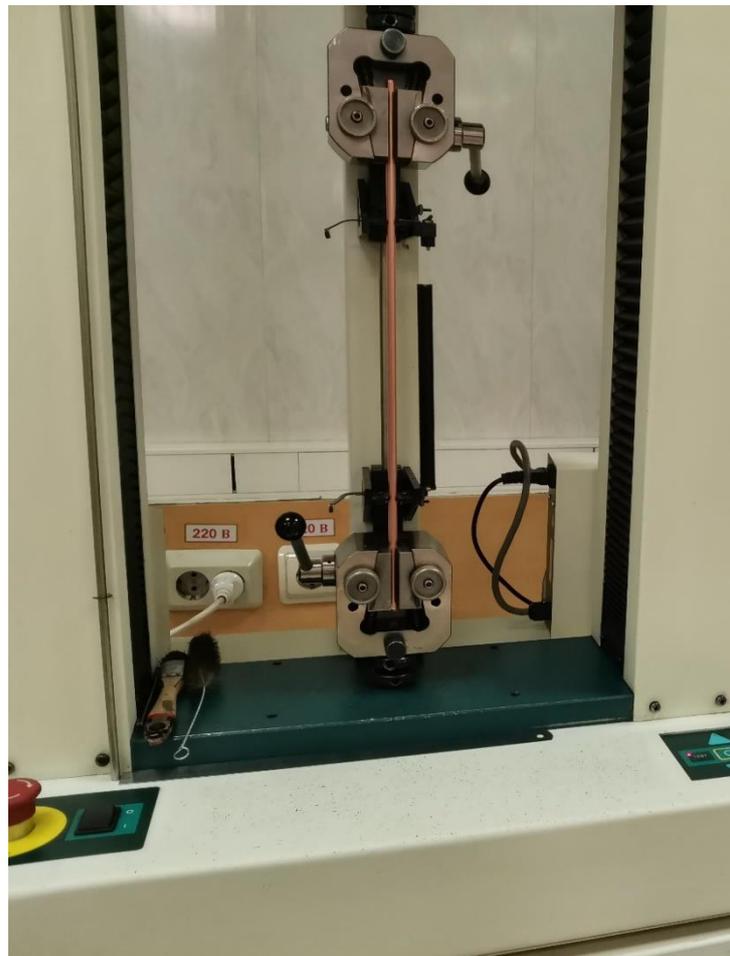


Рисунок 2.7 Разрывная машина TINIUS OLSEN T-СЕРИИ

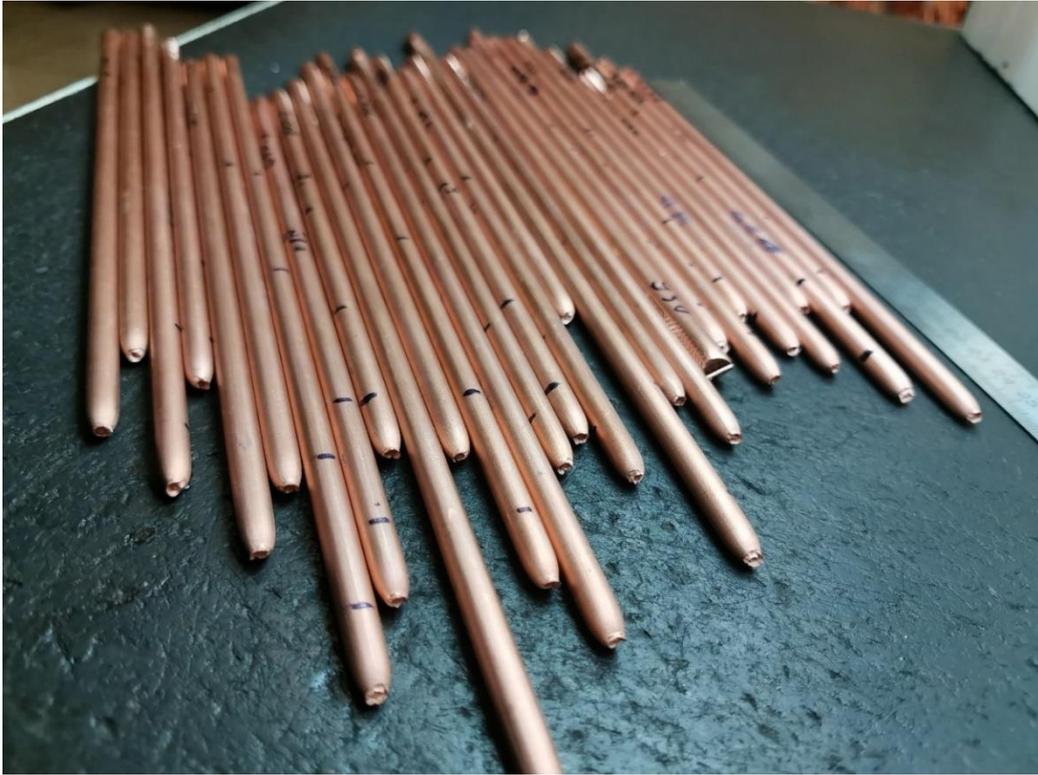


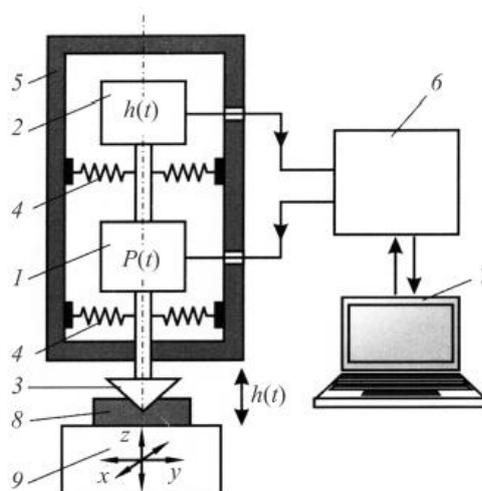
Рисунок 2.8 Образцы после испытания на разрыв

2.2.2.2 Измерения микротвердости по Виккерсу и модуля упругости

Под твердостью понимают способности поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора). Существуют различные методы измерения твердости. В случае измерения микротвердости в поверхность образца вдавливают алмазный индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. После удаления нагрузки P (в зависимости от условий опыта может меняться от 10 до 1000 Н, длительность воздействия 10...15 с) измеряют диагональ отпечатка d , оставшегося на поверхности. Число твердости HV определяют делением нагрузки на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка:

Под микроиндентированием понимается процесс, управляемый специальной испытательной установкой, при котором происходит непрерывное внедрение наконечника (алмазная пирамида Берковича, Виккерса, твердосплавный шарик и т. д.) в испытуемый образец под действием плавно возрастающей нагрузки с последующим ее снятием и регистрацией зависимости перемещения наконечника от нагрузки. Метод микроиндентирования обеспечивает возможность определения не только твердости, но и других механических характеристик материала, например, модуля упругости при индентировании, путем совместного измерения нагрузки и перемещения наконечника во время индентирования [26].

На рисунке 2.9 представлена схема установки для микроиндентирования.



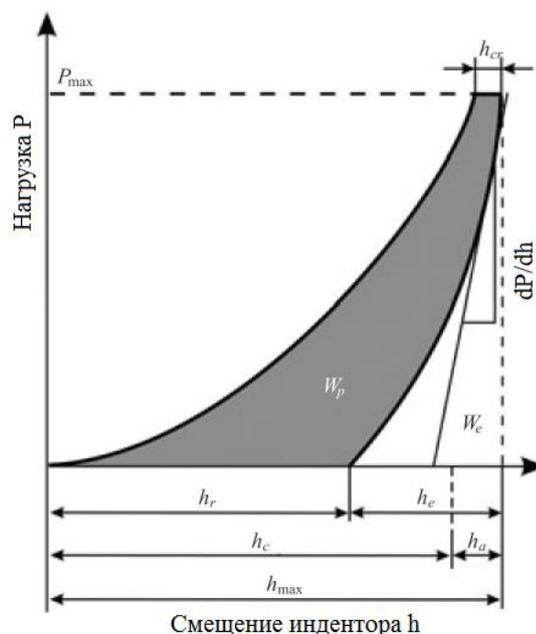
1 – силовая ячейка; 2 – датчик регистрации перемещения подвижного штока с индентором (3); 4 – пружины подвески штока; 5 – корпус измерительной головки; 6 – блок контроллера; 7 – компьютер; 8 – образец; 9 – предметный столик

Рисунок 2.9 Принципиальная схема устройства микроиндентометра [27]

Существует несколько десятков методов извлечения из диаграмм нагрузка – смещение индентора различных характеристик материала. Наиболее универсальным и удобным для индентирования пирамидальным инденторами метод Оливера У. и Фарра Дж. (МОФ). На рисунке 2.10 приведена схема диаграммы нагружения и ее расчет по МОФ [28]. Модуль упругости при растяжении E_{IT} можно вычислить по наклону касательной к кривой разгрузки на P–h-диаграмме. Его значение близко к значению модуля Юнга материала. Однако, если на образце присутствуют наплывы или впадины, может возникнуть значительная разница между модулем E_{IT} и модулем Юнга [26]. В зависимости от величины наплыва, они могут приводить к завышению модуля упругости до 30 % [29]. Значение модуля E_{IT} вычисляется по формуле (2.2) [26].

$$E_{IT} = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}}, \quad (2.2)$$

где ν_s – коэффициент Пуассона материала испытуемого образца; ν_i – коэффициент Пуассона материала наконечника (для алмаза 0,07); E_r – приведенный модуль упругости в области индентирования; E_i – модуль упругости наконечника (для алмаза 1140 ГПа).



h_r – глубина остаточного отпечатка; h_e – упругое восстановление; h_a – упругий прогиб поверхности образца; h_{max} – максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке P_{max} ; h_{cr} – ползучесть при $P = const$; W_p – работа пластической деформации при формировании отпечатка; W_e – работа упругой деформации; $dP/dh = S$ – жесткость в контакте индентор образец.

Рисунок 2.10 Схема диаграммы нагружения [28]

В свою очередь E_r рассчитывается согласно уравнению 2.3:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2S\sqrt{A_p}}, \quad (2.3)$$

где A_p – площадь поперечного сечения контактной поверхности между наконечником и испытуемым образцом.

Для наконечника Виккерса при его погружении в материал более 6 мкм, площадь контактной поверхности может быть определена следующим образом [26 ; 28]:

$$A_p = 24,50 h_p^2, \quad (2.4)$$

где h_p – глубина контакта наконечника с испытуемым образцом.

Измерения микротвердости по Виккерсу и модуля упругости проводились на исследовательском комплексе микроидентификации производства CSM МНТ методом Oliver&Pharr, нагрузка 1 Н, коэффициент Пуассона 0,32, по 5 отпечатков на каждом образце.

2.2.3 Оптическая металлография

Металлография является методом качественного и количественного исследования структуры металлов и сплавов. Качественные методы исследования структуры позволяют описать тип, форму, размер и взаимное расположение обнаруженных фаз и структурных составляющих. Задача количественной металлографии состоит в изучении характеристик пространственного строения структуры путем измерения численных параметров микроскопического изображения. Основные операции количественной металлографии – подсчет, измерение и классификация элементов, находящихся в поле зрения. Результатом могут быть, в частности, количественные параметры зерна или объемные доли различных фаз в структуре сплава. Для выполнения металлографических исследований необходимы специально подготовленные образцы – металлографические шлифы. Исследования этих образцов проводятся с помощью микроскопов, работающих в отраженном свете [30].

Металлографический анализ осуществляли с применением оптического микроскопа Olympus GX 51 с программным пакетом анализа изображений SIAMS 700 при увеличениях от 50 до 1000 крат. Определение размера зерна осуществлялось с помощью внутреннего инструментария программы SIAMS, а также вручную методом секущих. Первый метод выдал ложные результаты из-за большого количества двойников отжига в отожженной меди. Поэтому за истинные данные размера зерна были приняты расчёты размера зерна ручным способом.

2.3 Методы оценки ошибки измерений

Расчет погрешностей осуществляли по формулам, приведенным ниже [31].

1. Расчёт погрешностей при прямых многократных измерениях.

Среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} . \quad (2.5)$$

Абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta x_1 = |\bar{x} - x_1|, \Delta x_2 = |\bar{x} - x_2|, \dots, \Delta x_n = |\bar{x} - x_n| . \quad (2.6)$$

Среднеквадратичная погрешность:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} . \quad (2.7)$$

Доверительные границы случайной погрешности:

$$\Delta_x = t_{\alpha, f} \cdot S_x; \Delta_x = t_{\alpha, f} \cdot \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n(n-1)}}. \quad (2.8)$$

где $t_{\alpha, f}$ – коэффициент Стьюдента, находится по таблицам в соответствии с выбранным уровнем значимости α и числом степеней свободы $f = n - 1$.

Систематическая погрешность (погрешность средства измерения):

$$\theta_x = \frac{K \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{100}, \quad (2.9)$$

где K – класс точности; x_{\max} и x_{\min} – верхний и нижний пределы измерений данного прибора. Для приборов, не имеющих класса точности, граница систематической погрешности принимается равной цене деления (с вероятностью $P = 0,997$).

Абсолютная погрешность результата прямых многократных измерений:

$$\Delta x = \sqrt{(t_{\alpha, f} \cdot S_x)^2 + (t_{\alpha, \infty} \cdot 1/3 \cdot \theta_x)^2} \quad (2.10)$$

Относительная погрешность:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x} \quad (2.11)$$

Результат многократных измерений – доверительный интервал, в котором находится действительное значение измеренной величины с заданной доверительной вероятностью:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (2.12)$$

2. Расчёт погрешности при косвенных воспроизводимых измерениях величины $Z(a, b, c)$.

По результатам прямых многократных измерений величин a , b , c – аргументов функции $Z(a, b, c)$ найдены их погрешности Δa , Δb , Δc .

Среднее значение искомой величины:

$$\bar{Z} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}). \quad (2.13)$$

Абсолютная погрешность ΔZ косвенного измерения рассчитана методом непосредственного дифференцирования:

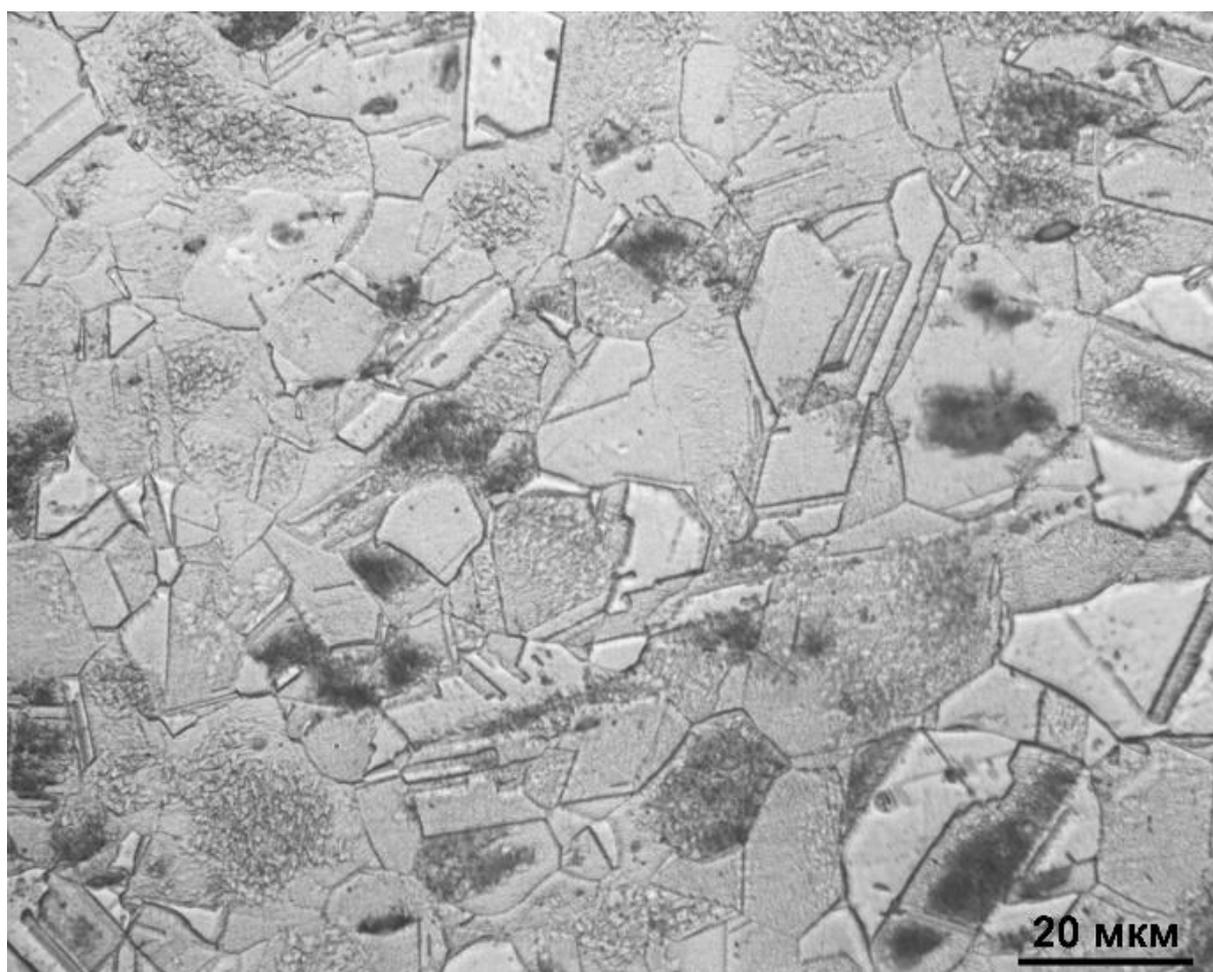
$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial c} \Delta c\right)^2}. \quad (2.14)$$

Результат представлен в виде $Z = \bar{Z} \pm \Delta Z$. [31]

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.3 Исследования с обычными настройками производства

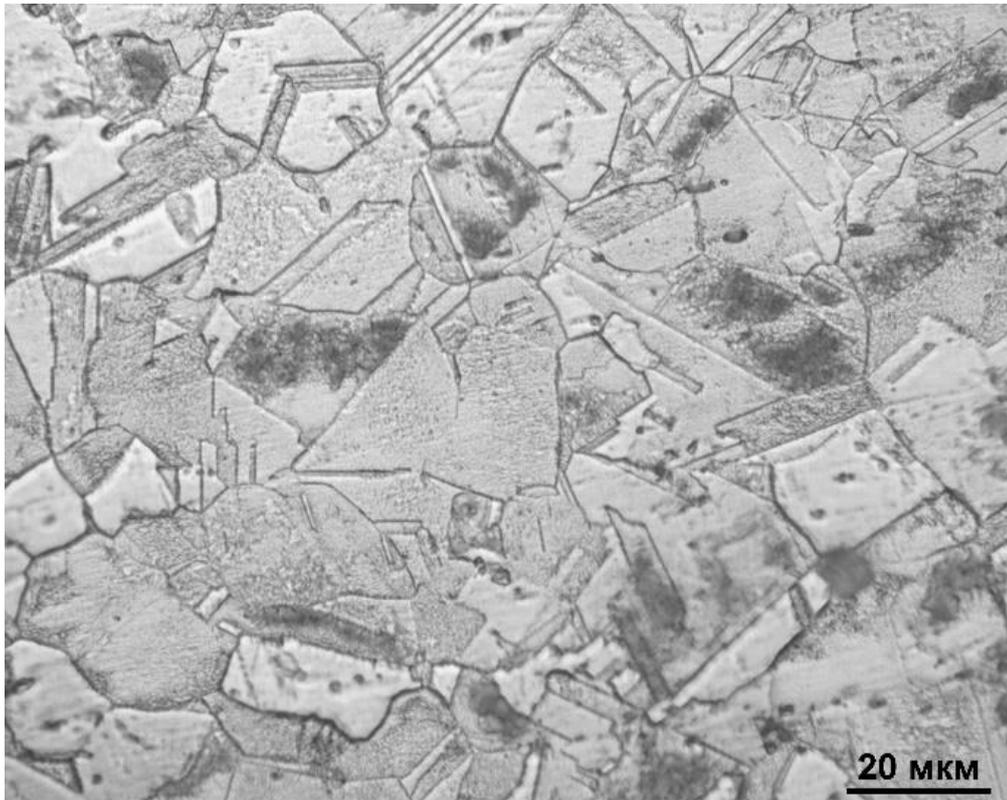
В первую очередь были исследованы образцы медной катанки, отобранные в период времени, когда всё производство работало исправно. Была изучена микроструктура и измерен размер зёрен по методу секущих. На рисунке 3.1 приведены результаты съёмки на оптический микроскоп.



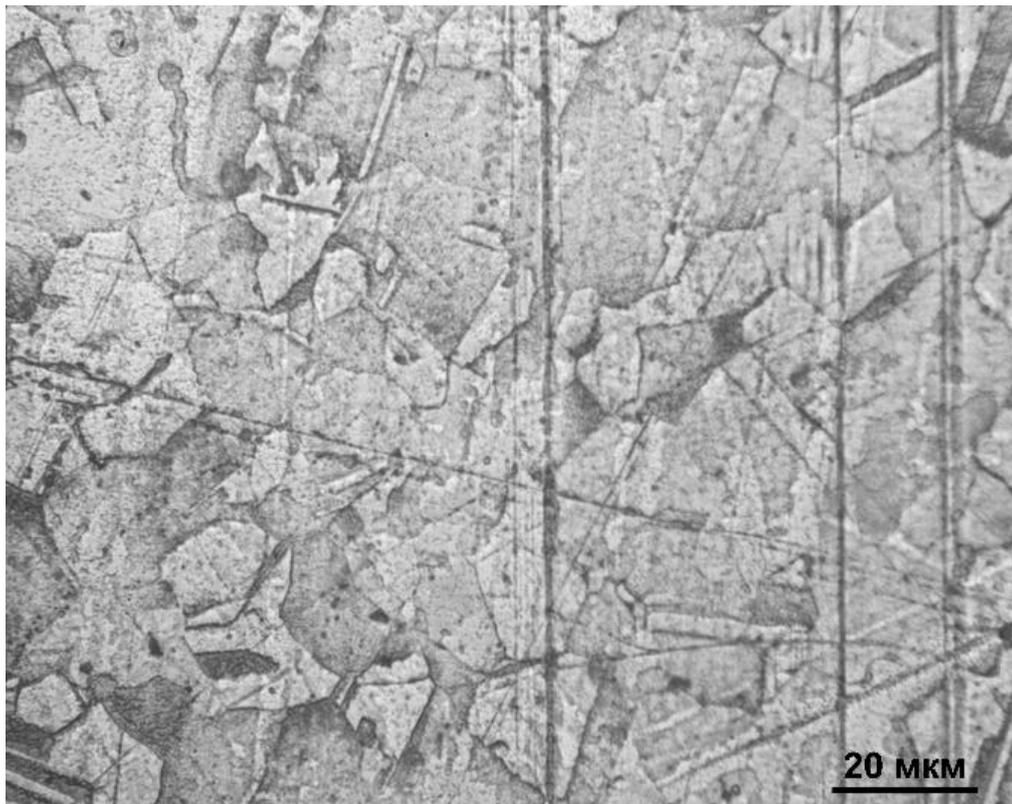
а

а- продольный шлиф

Рисунок 3.1 Микроструктура медной катанки с обычными настройками производства



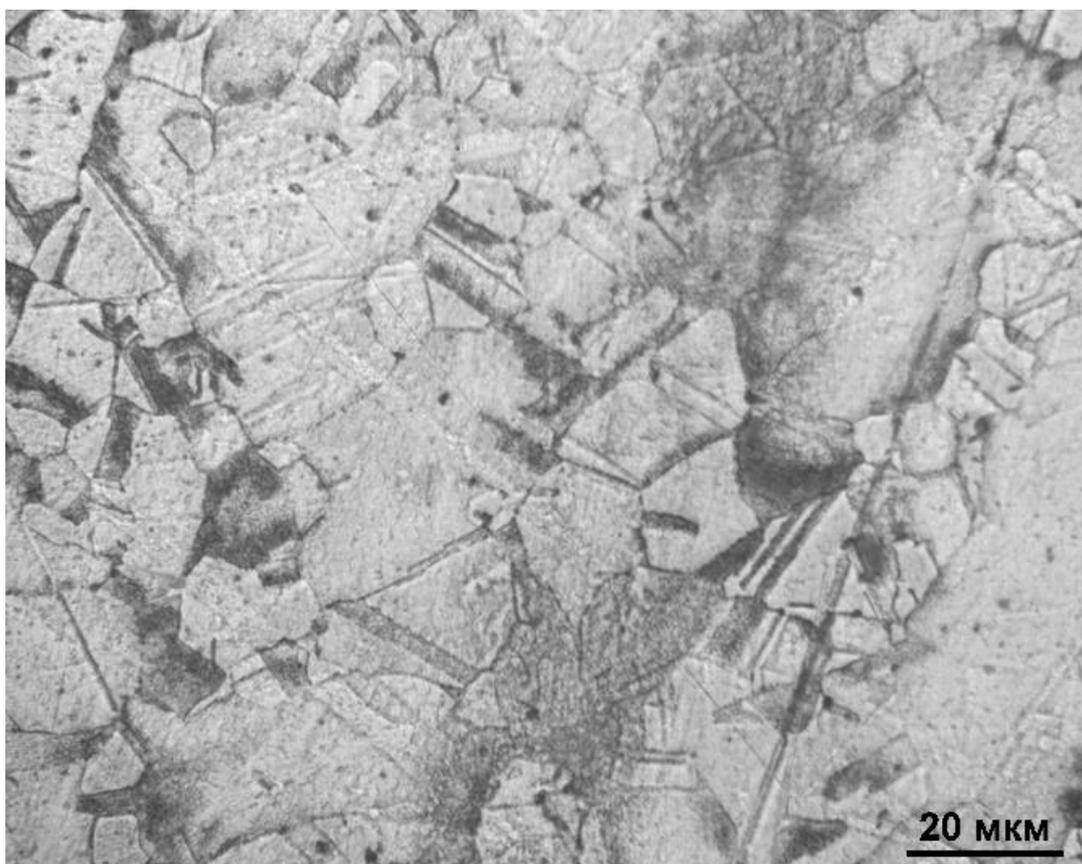
б



в

б- продольный шлиф; в- поперечный шлиф.

Рисунок 3.1 Продолжение



Г

г- поперечный шлиф

Рисунок 3.1 Продолжение

Изучая структуру катанки, было выявлено, что зёрна меди имеют равноосную форму, при этом каких-то очевидных отличий между зёрнами поперечного и продольного шлифов выявлено не было. Так же по всей структуре наблюдается очень большое количество двойников отжига, которые мешали программному обеспечению объективно оценивать размеры зёрен.

Так же были проведены испытания на разрыв с измерением большого количества показателей. Таких как относительное удлинение, временное сопротивление, диаметр катанки до разрыва, диаметр шейки.

Эксперименты микроиндентирования показали, что при обычных настройках производства значения микротвёрдости и модуля упругости не имеют большого разброса. Средние значения микротвёрдости:

HV= 98 баллов

EIT= 111 ГПа

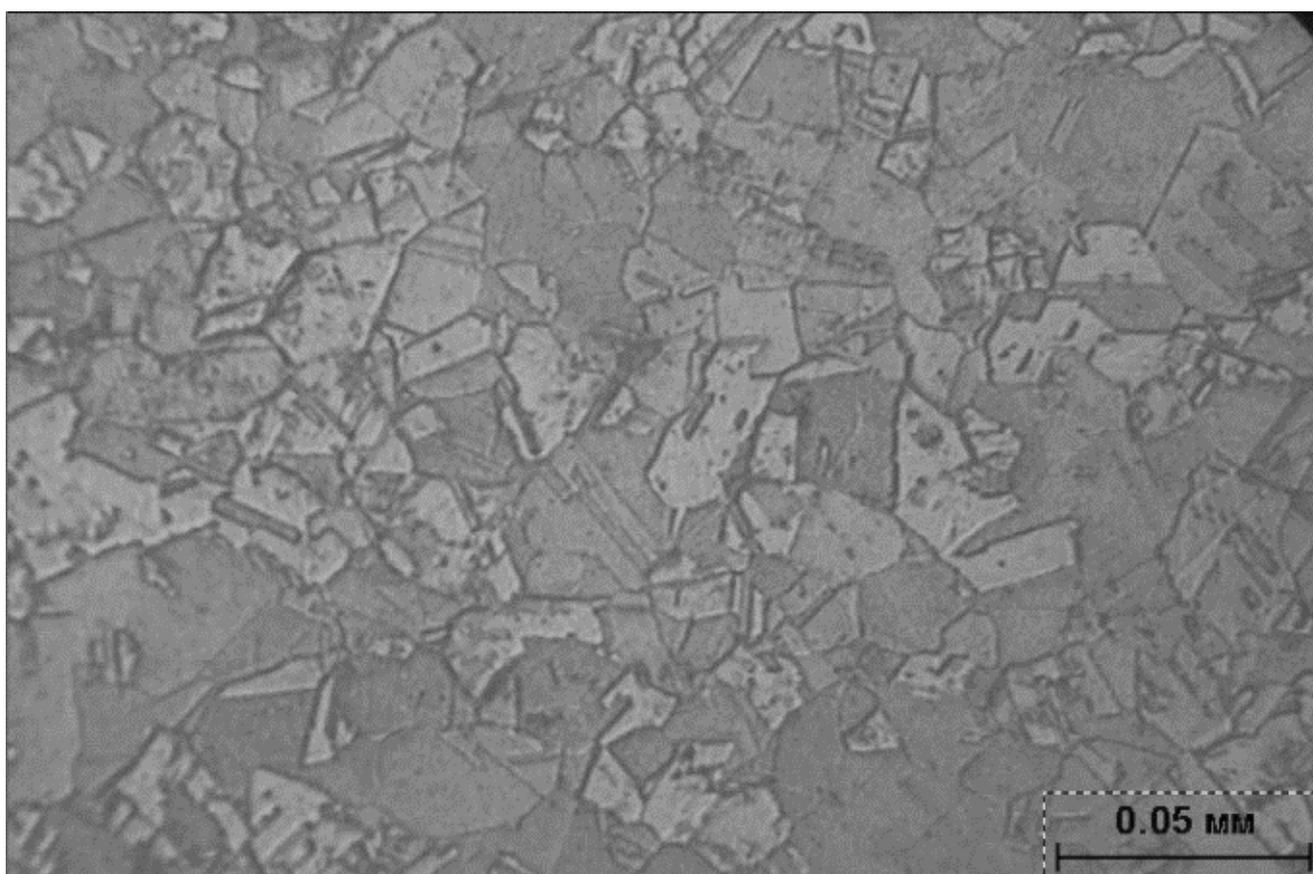
В таблице 3.1 представлены все результаты измерений, проведённые в катанке, при обычных условиях производства.

Таблица 3.1 Свойства медной катанки во время обычных настроек производства

№	Размер зерна	Относительное удлинение δ , %	Временное сопротивление, σ ГПа	Диаметр шейки, мм	Относительное сужение шейки, %	Средний диаметр катанки, мм
1	5,83	43,73	231,00	3,51	55,90	7,96
2	7,07	42,08	231,800	3,49	56,13	7,96
3	5,03	43,33	232,3	3,51	57,56	8,00
4	5,21	44,75	231,30	3,60	57,60	7,97
5	8,80	43,10	231,50	3,71	53,50	7,98
6	9,15	41,40	235,70	3,69	53,84	7,98
7	7,84	42,80	228,50	3,61	54,97	8,01
8	7,29	43,85	226,80	3,48	56,52	7,99

3.2 Опыт с дополнительной настройкой трайб аппарата

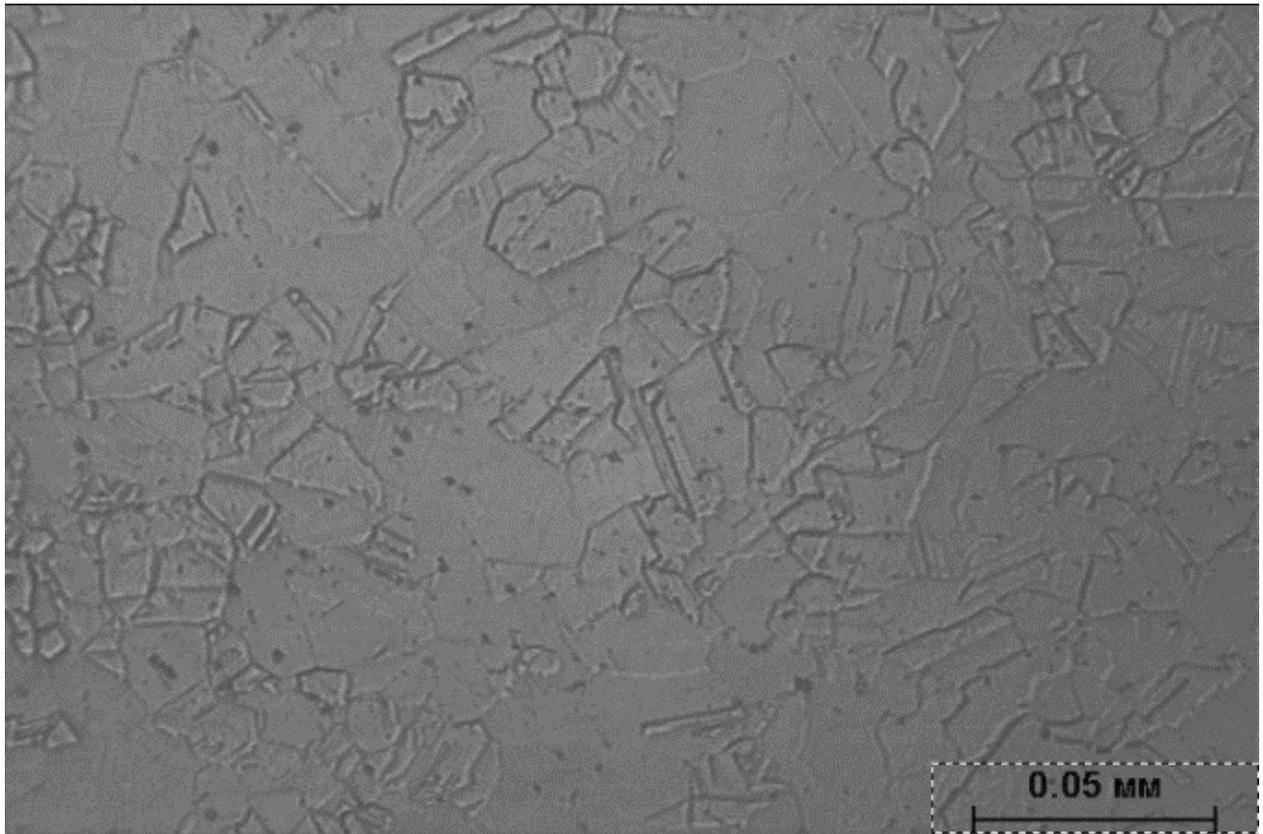
Далее на производстве в качестве эксперимента были изменены настройки трайб аппарата на меньшую плавность его работы. Продолжительность работы производства медной катанки с данными настройками была 1 месяц, в это время периодически наблюдалось существенное снижение пластических свойств. На рисунке 3.2 представлена структура медной катанки в различные этапы этого периода. Также в таблице 3.2 приведены показатели пластичности.



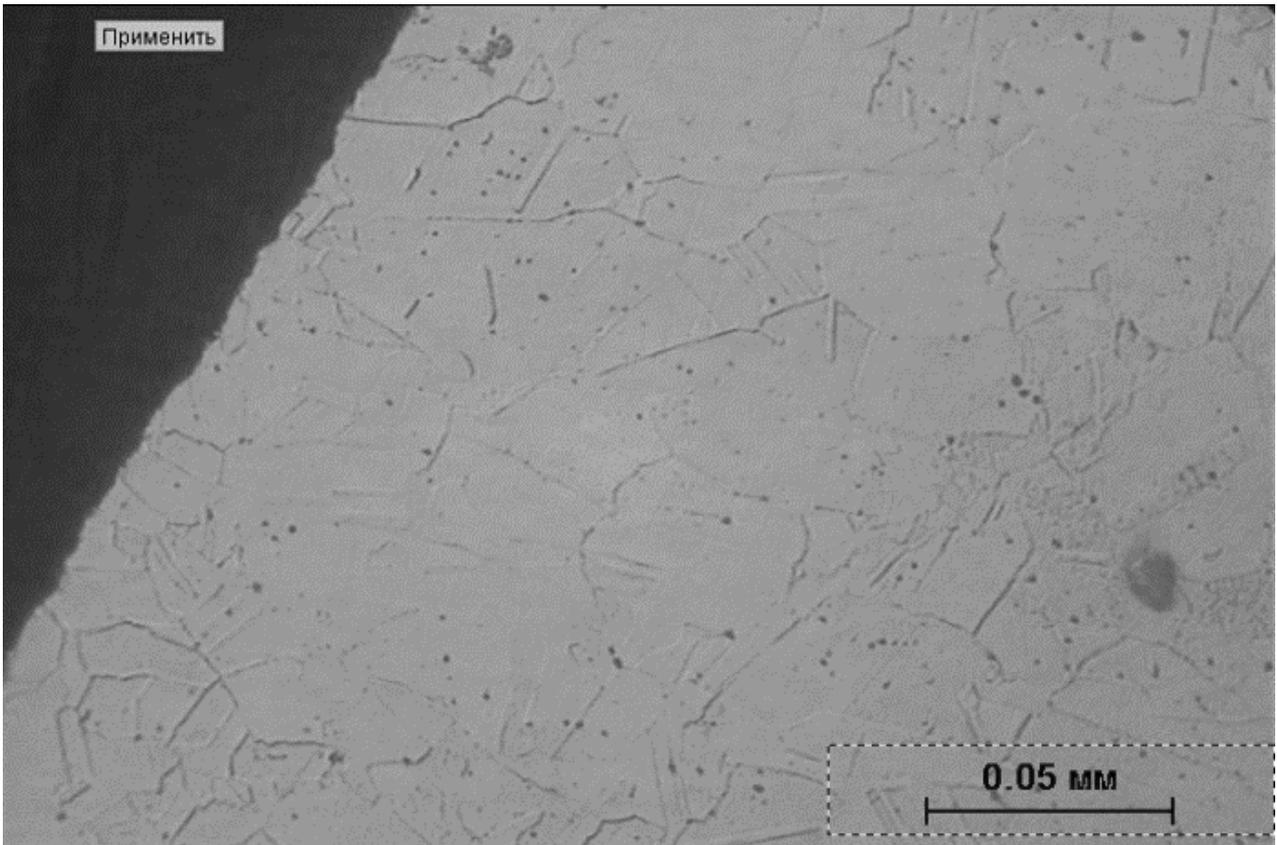
а

а-начало периода

Рисунок 3.2 Микроструктура медной катанки во время особой настройки производства



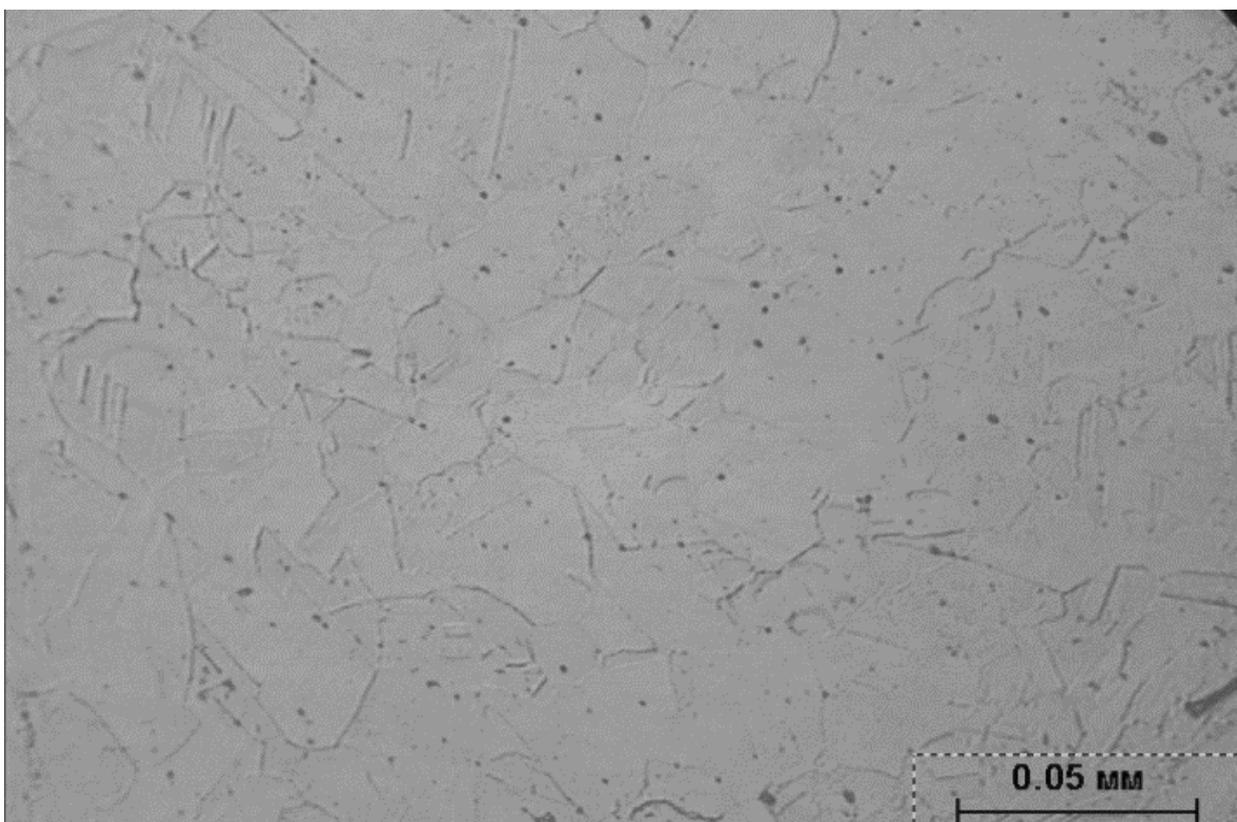
б



в

б-начало периода; в-середина периода

Рисунок 3.2 Продолжение



Г

Г-конец периода

Рисунок 3.2 Продолжение

Изучая структуру катанки во время работы прокатного стана с дополнительной настройкой трайб аппарата, было выявлено, что зёрна меди также имеют равноосную форму, при этом каких-то очевидных отличий между зёрнами в начале, середине и в конце периода настройки выявлено не было. Так же по всей структуре наблюдается очень большое количество двойников отжига, которые мешали программному обеспечению объективно оценивать размеры зёрен.

Таблица 3.2 Пластические свойства и размер зерна медной катанки во время работы трайб аппарата со специальными настройками.

№	Размер зерна, мм	Относительное удлинение, δ %
1	6,44	37
2	6,50	41
3	7,29	44
4	7,35	41

Продолжение таблицы 3.2

5	7,83	44,5
6	8,02	40,5
7	8,50	41
8	8,87	41
9	9,38	37

3.3 Опыт с медленной скоростью охлаждения

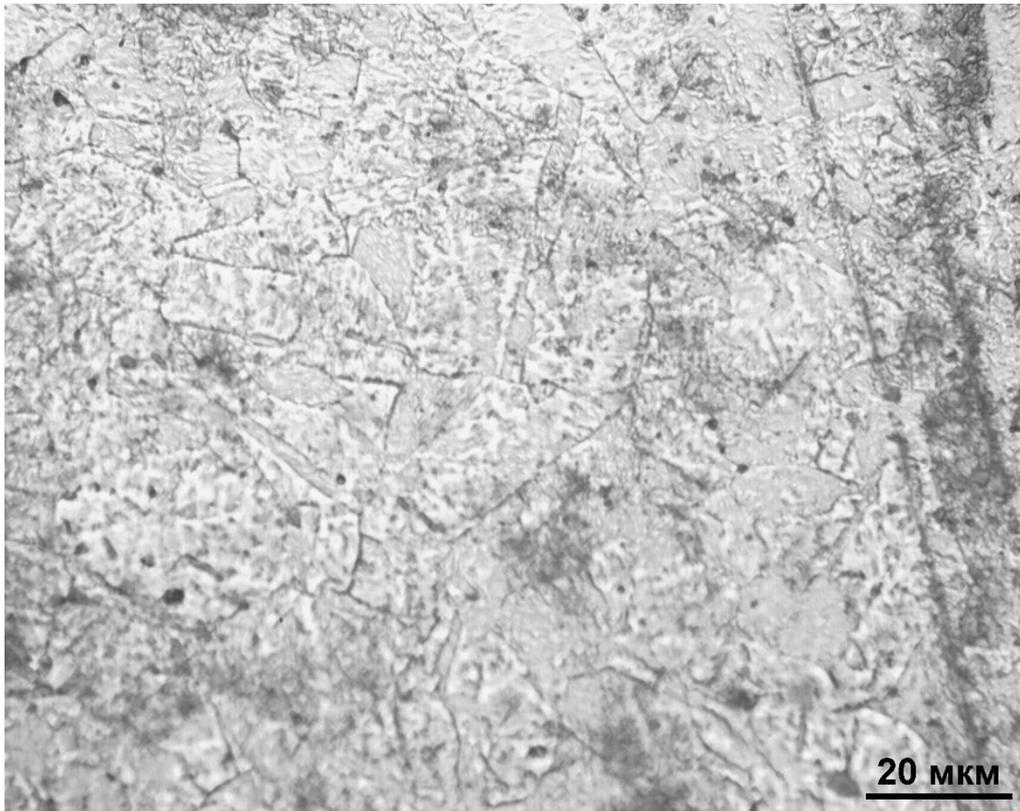
Далее на производстве был проделан эксперимент по постепенному снижению скорости охлаждения медной катанки. Температура жидкости в линии освещения постепенно росла от 30 до 70 °С при этом визуально катанка становилась более окисленной и более тёмной. Длительность эксперимента 7 минут. Для исследований каждую минуту отбирался образец для экспериментов. В сумме вышло 7 образцов, на которых были измерены следующие показатели

Относительное удлинение,
Временное сопротивление,
Условный предел текучести,

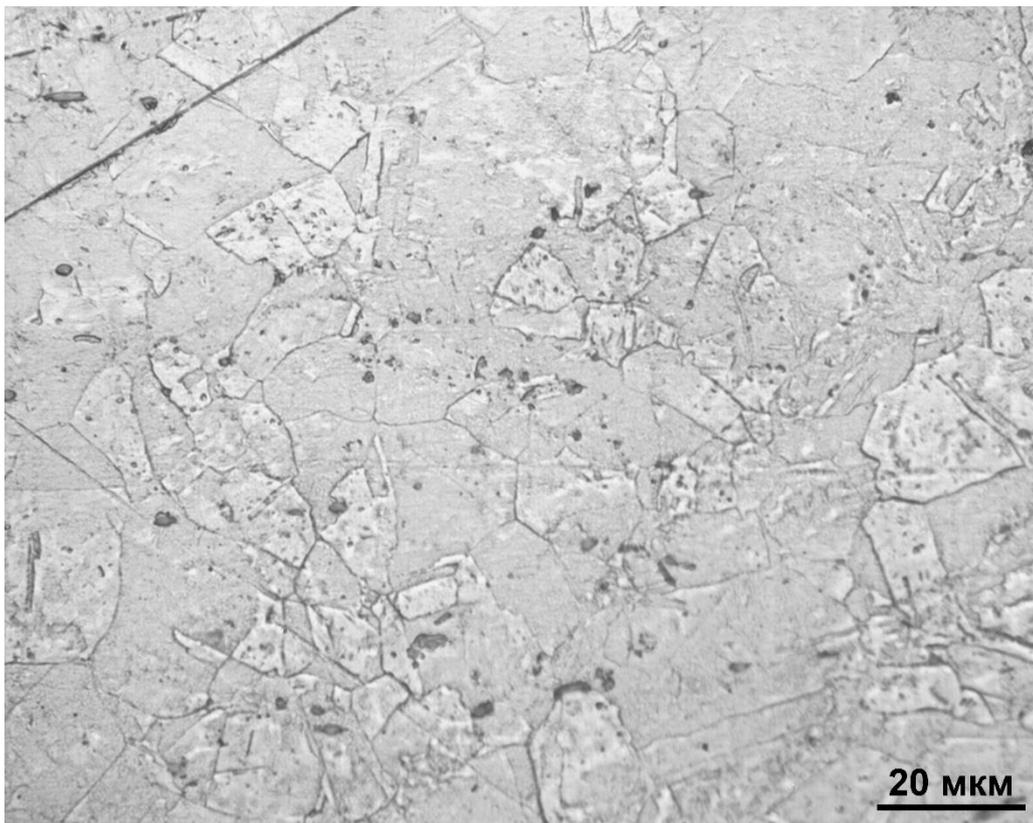
А также в поперечном и продольном сечениях отдельно:

Размер зерна в ПО SIAMS,
Размер зерна вручную методом секущих,
Число твёрдости HV,
Модуль упругости ЕП.

Исходя из высокой скорости подачи катанки можно предположить, что скорость повышения роста температуры жидкости в баке осветителя была равномерной, порядка 6,7 °С в минуту. Изучая структуру катанки (рисунок 3.3), было выявлено, что зёрна меди имеют равноосную форму, при этом каких-то очевидных отличий между зёрнами поперечного и продольного шлифов одного образца выявлено не было, при этом даже не проводя дополнительных измерений очевидно, что зерно увеличивается в размерах с каждой следующей минутой эксперимента, а в 7ом образце размер зерна существенно выше чем во всех других наблюдаемых в данной работе. Так же по всей структуре наблюдается очень большое количество двойников отжига, которые мешали программному обеспечению объективно оценивать размеры зёрен.

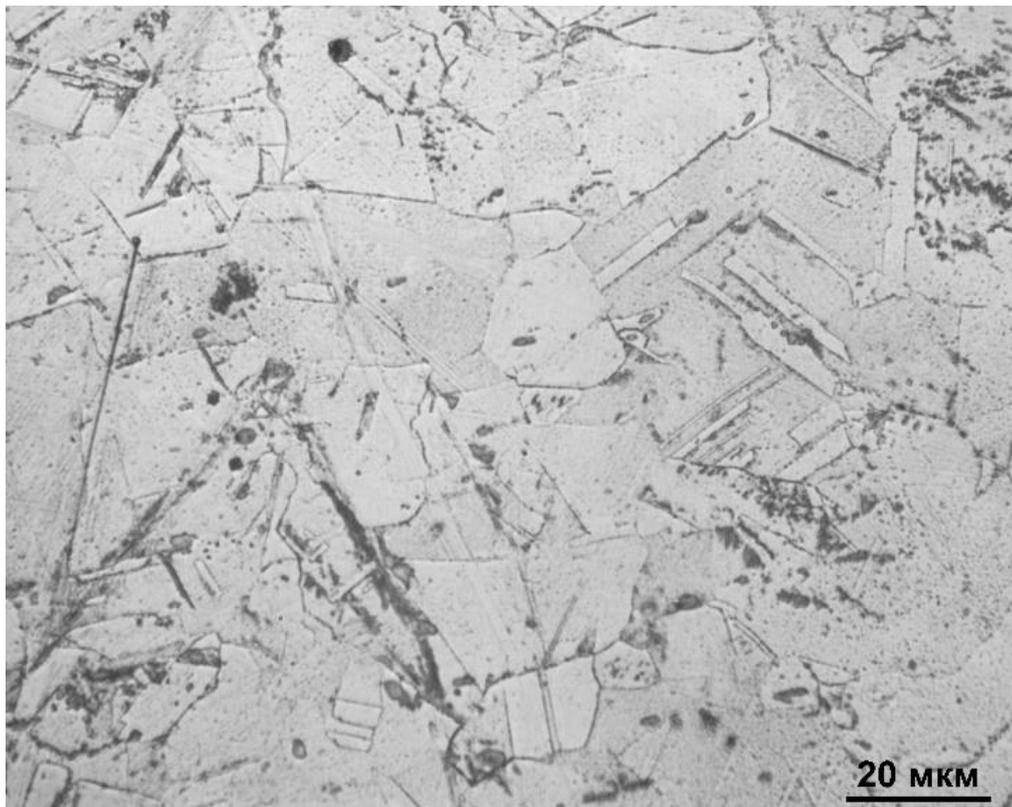


а

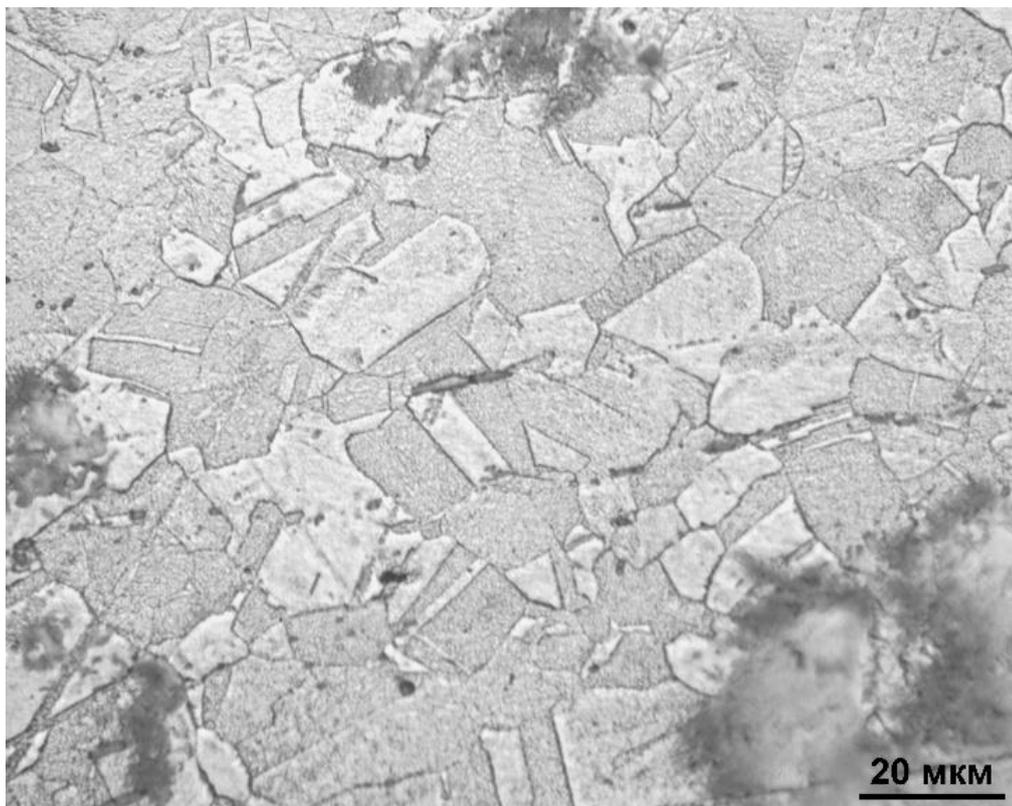


б

а-поперечное сечение, образец 1; б-продольное сечение образец 1;
Рисунок 3.3 Микроструктура медной катанки во время экспериментальных
настроек охлаждения



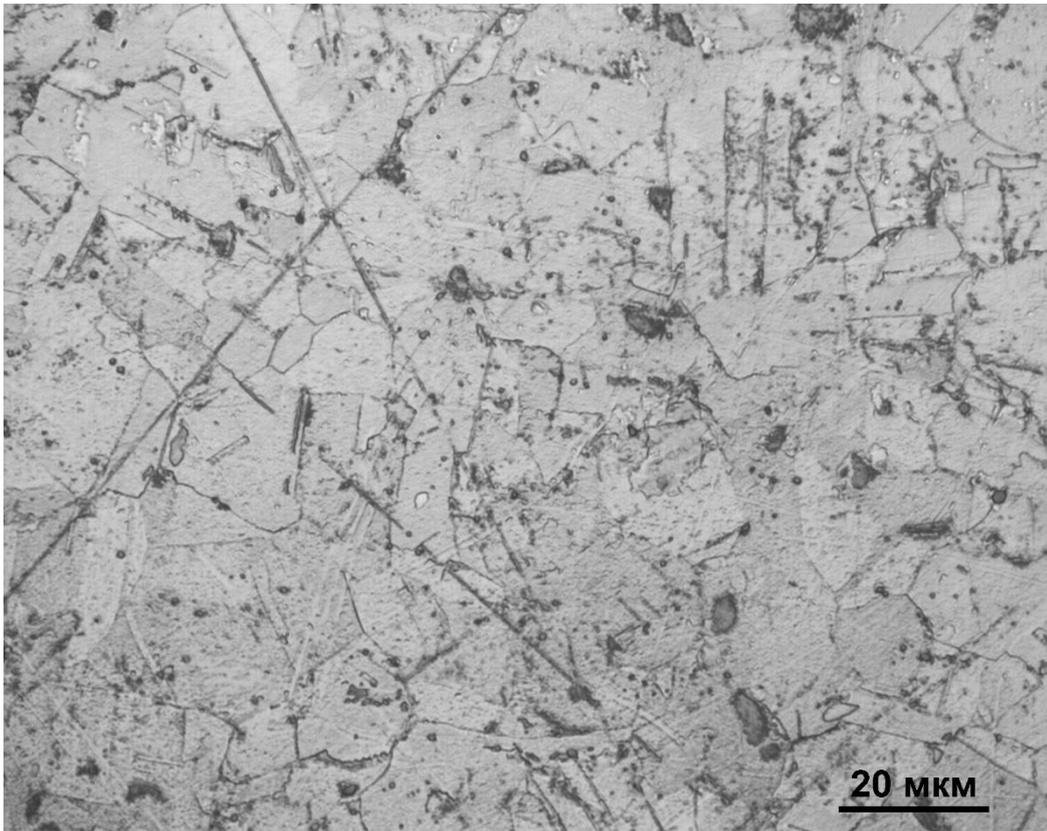
В



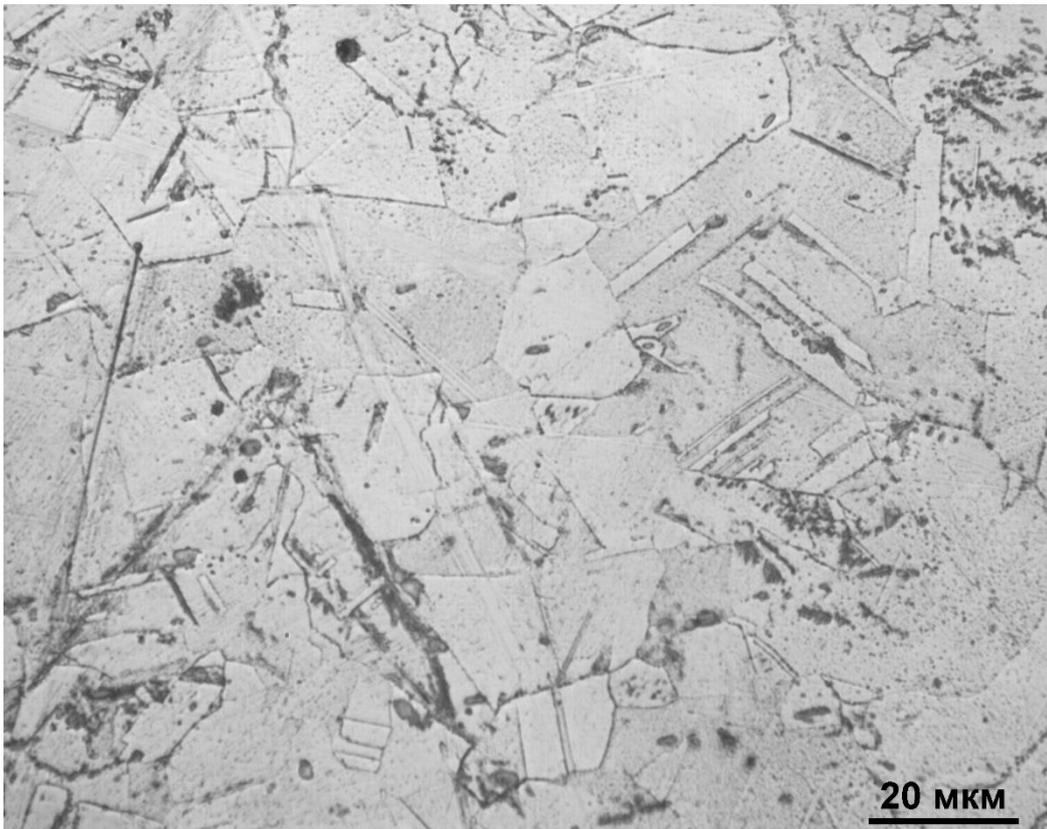
Г

в-поперечное сечение, образец 2; г-продольное сечение образец 2;

Рисунок 3.3 Продолжение



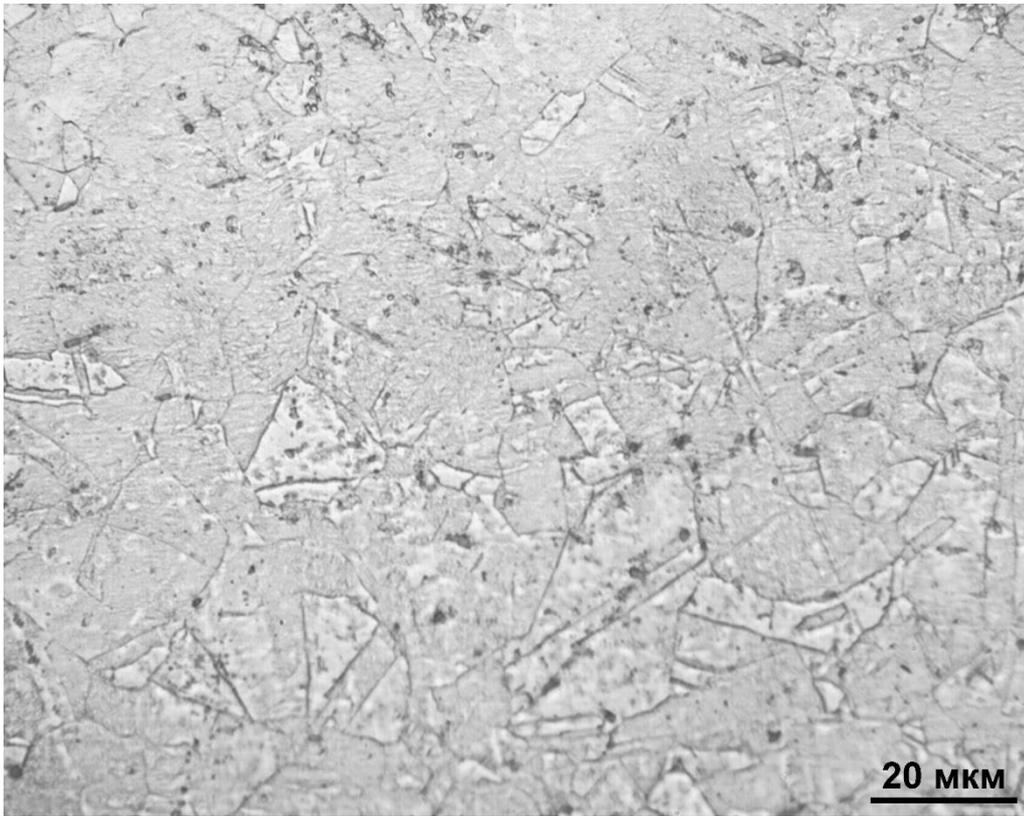
д



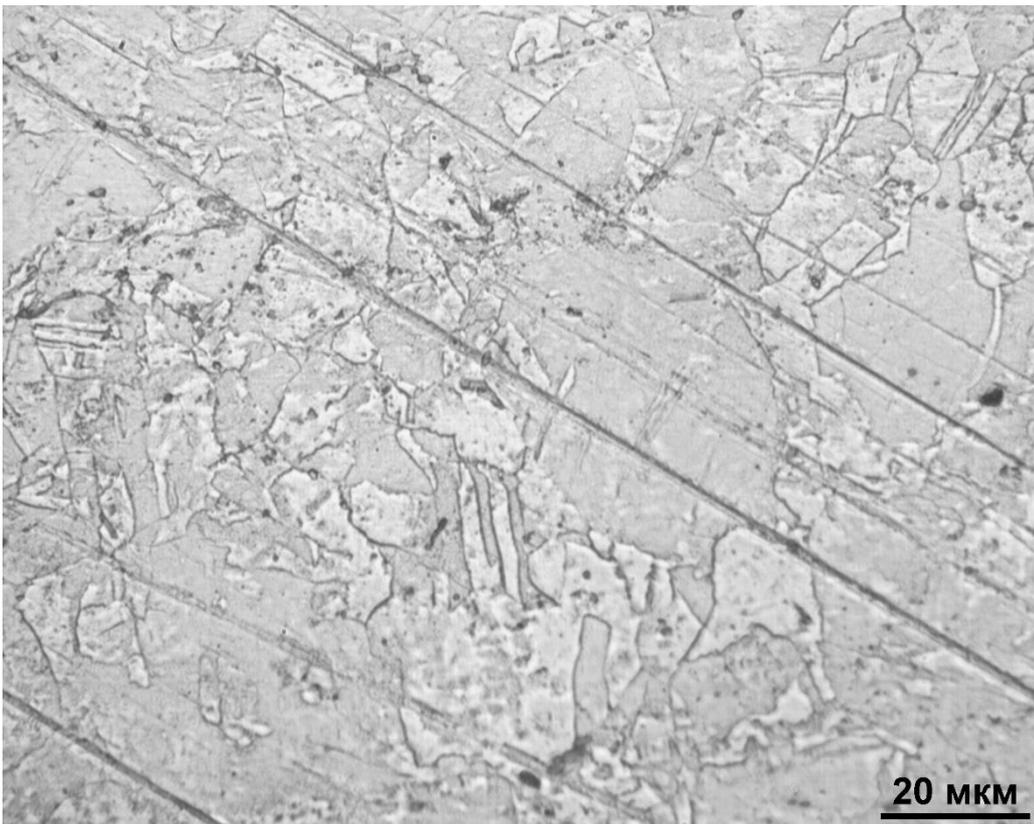
е

д-поперечное сечение, образец 3; е-продольное сечение образец 3;

Рисунок 3.3 Продолжение



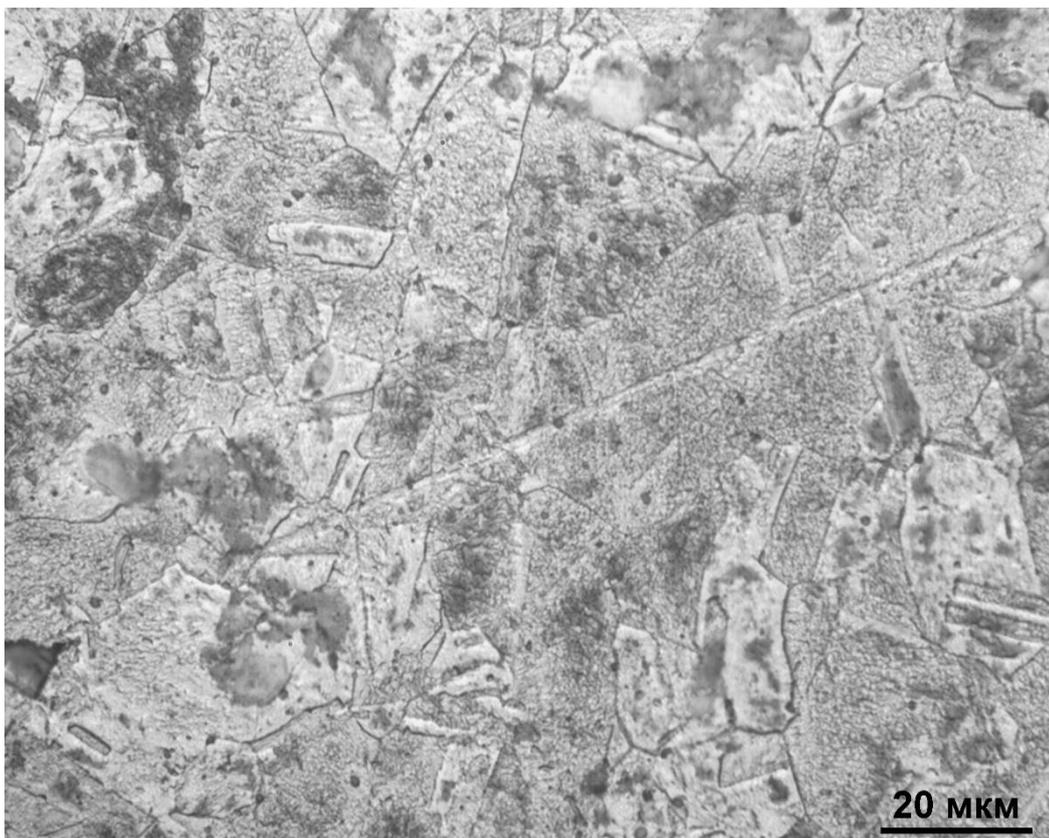
ж



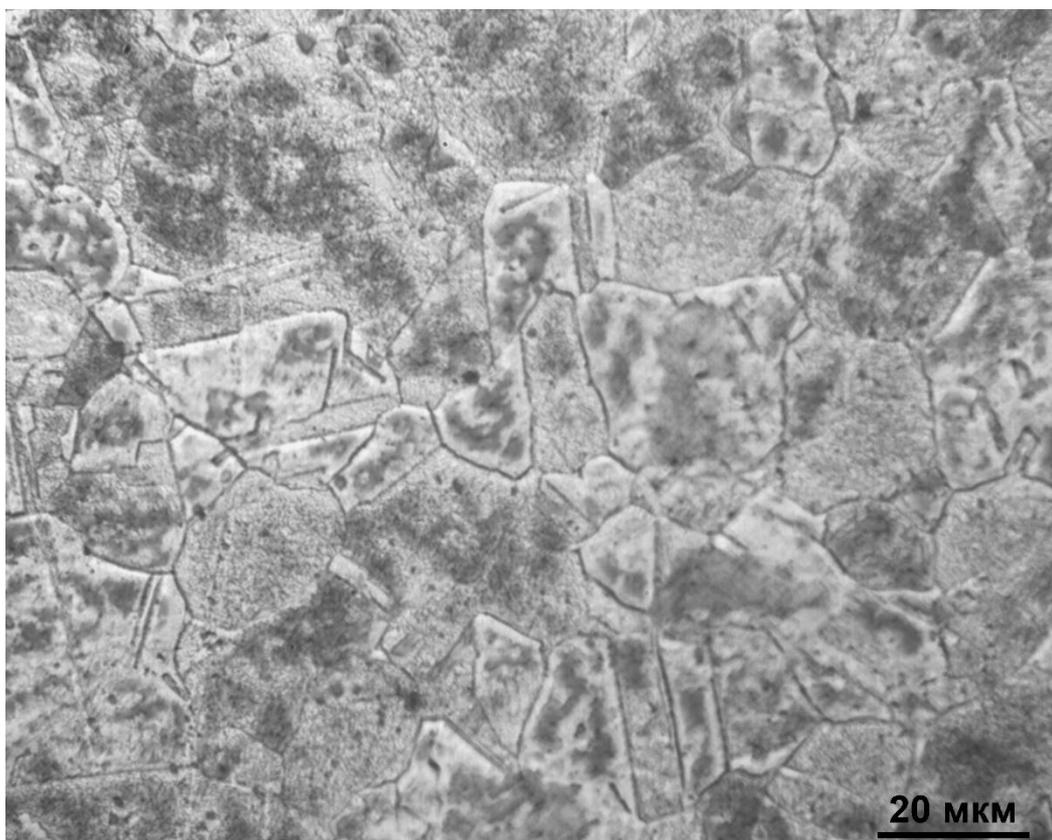
з

ж-поперечное сечение, образец 4; з-продольное сечение образец 4;

Рисунок 3.3 Продолжение



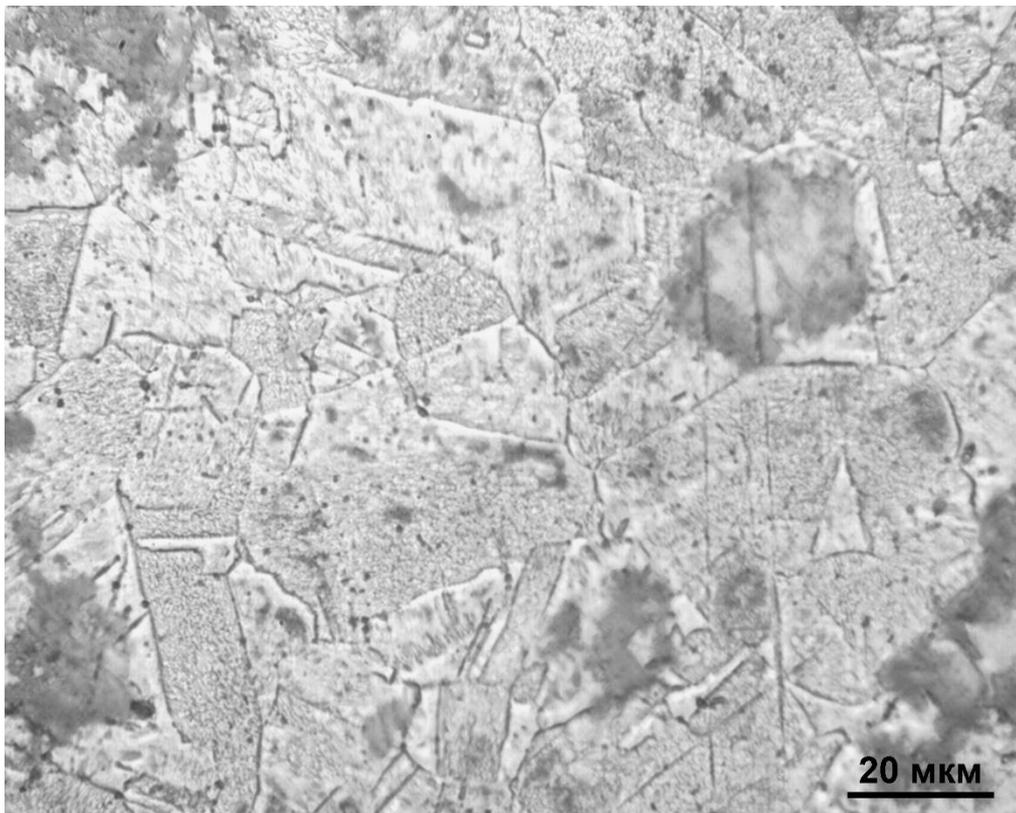
и



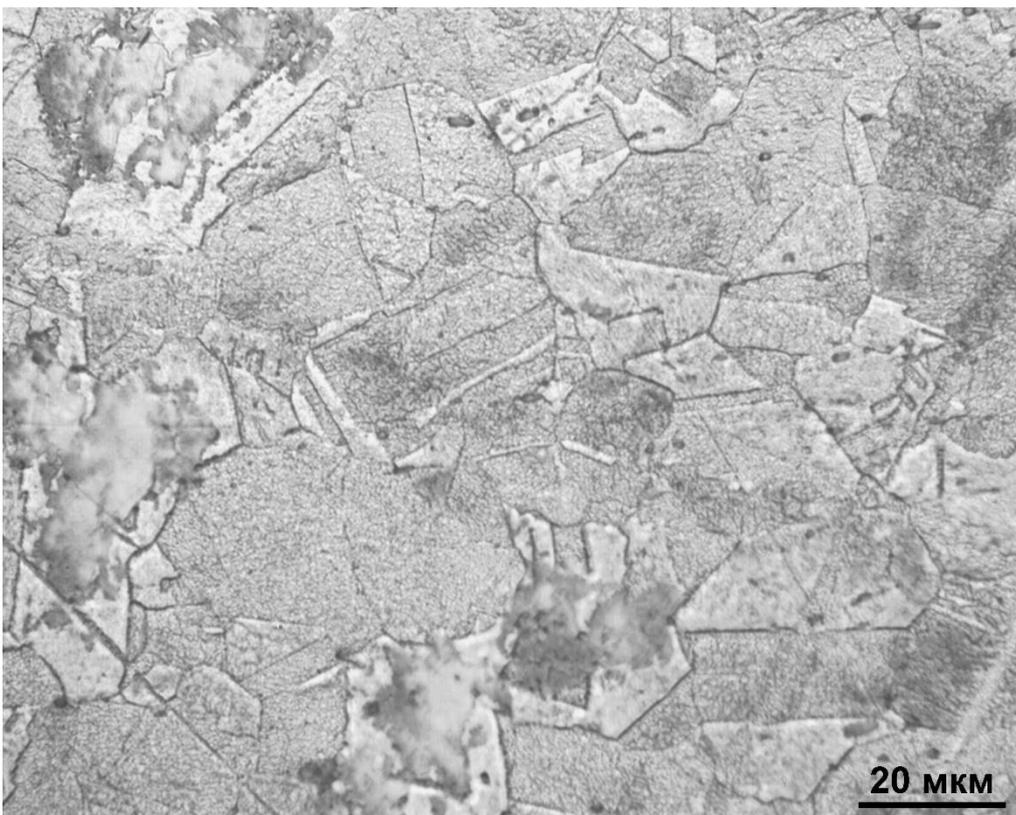
к

и-поперечное сечение, образец 5; к-продольное сечение образец 5;

Рисунок 3.3 Продолжение



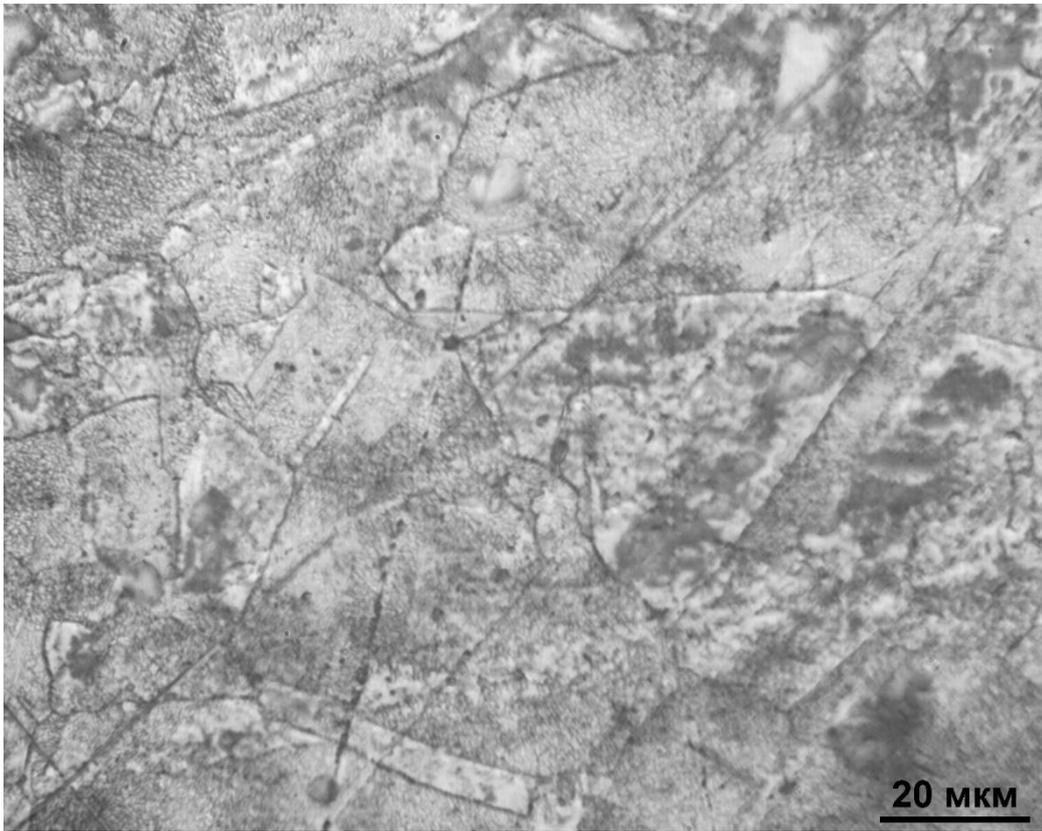
л



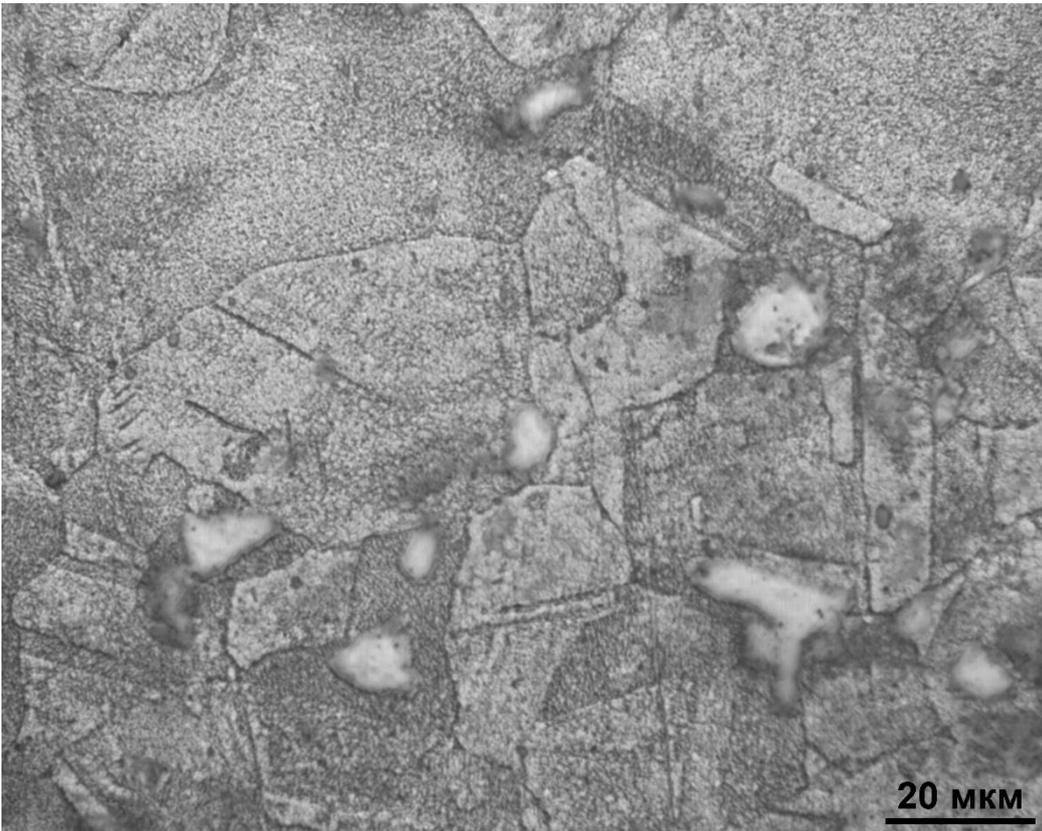
м

л-поперечное сечение, образец б; м-продольное сечение образец б;

Рисунок 3.3 Продолжение



н



о

н-поперечное сечение, образец 7; о-продольное сечение образец 7;

Рисунок 3.3 Продолжение

Данные полученные микроиндентированием представлены в таблице 3.3. Эти измерения были сделаны наравне с измерением пластических свойств, в попытке найти какие-либо корреляции с размером зерна

В таблице 3.4 представлены данные по размеру зёрен измеренные изначально в программном обеспечении SIAMS, после чего было принято решение перепроверить эти данные ручным способом, методом секущих. Данное решение было принято из-за того, что в SIAMS наблюдалось считывание двойников отжига в качестве отдельных зёрен и их границ, что повлекло за собой малое значение размеров зёрен. Далее приводя цифры размера зёрен за истинные, брались показатели, рассчитанные вручную.

Пластические свойства испытывались экспериментом на одноосное растяжение, который считается самым показательным для образцов медной катанки. В таблице 3.5 представлены измеряемые данные.

Таблица 3.3 Свойства медной катанки

№ пробы	Положение пробы	ЕП, ГПа	HV, ГПа	Средний ЕП, ГПа	Средний HV, ГПа
1	Поперечный	118,13	101,36	112,47	95,83
	Продольный	106,81	90,31		
2	Поперечный	121,71	96,87	114,51	100,94
	Продольный	107,30	105,02		
3	Поперечный	101,13	110,87	103,09	108,13
	Продольный	105,05	105,39		
4	Поперечный	104,20	105,13	99,71	99,80
	Продольный	95,22	94,47		
5	Поперечный	74,56	118,59	90,68	110,63
	Продольный	106,80	102,66		

Продолжение таблицы 3.3

6	Поперечный	111,41	100,98	101,51	99,78
	Продольный	91,61	98,58		
7	Поперечный	108,37	89,58	100,97	88,58
	Продольный	93,58	87,58		

Таблица 3.4 Размеры зёрен, рассчитанные разными способами

№ пробы	Положение пробы	Размер зерна в ПО SIAMS		Размер зерна методом секущих	
		Диаметр зерна, мкм	Средний диаметр зерна, мкм	Диаметр зерна, мкм	Средний диаметр зерна, мкм
1	Поперечный	6,34	6,44	9,14	8,80
	Продольный	6,53		8,46	
2	Поперечный	5,73	6,17	9,93	9,14
	Продольный	6,6		8,36	
3	Поперечный	6,19	6,36	11,42	10,61
	Продольный	6,52		9,79	
4	Поперечный	6,71	7,09	11,42	11,62
	Продольный	7,46		11,82	
5	Поперечный	6,77	6,71	12,01	12,01
	Продольный	6,65		12,05	
6	Поперечный	5,85	5,95	12,46	12,95
	Продольный	6,04		13,44	
7	Поперечный	6,39	6,16	19,04	20,23
	Продольный	5,92		21,42	

Таблиц 3.5 Пластические свойства медной катанки после эксперимента на снижение скорости охлаждения.

№ пробы	Относительное удлинение δ , %	Временное сопротивление σ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
1	43,1	231,5	129,5
2	41,40	235,70	128,1
3	40,7	230,3	127
4	42,7	233	134,2
5	41,7	232	127,3
5(2)	42,85	233,3	132,9
6	43,25	226,5	126,4
7	45,45	203,4	44,02

3.4 Анализ взаимосвязей

Анализ структуры медной катанки при обычных настройках производства показал, что пронаблюдать какую-либо взаимосвязь структуры, размера зерна с таким показателем как временное сопротивление после испытания на разрыв почти невозможно. На рисунке 3.4 продемонстрировано отсутствие данной взаимосвязи.

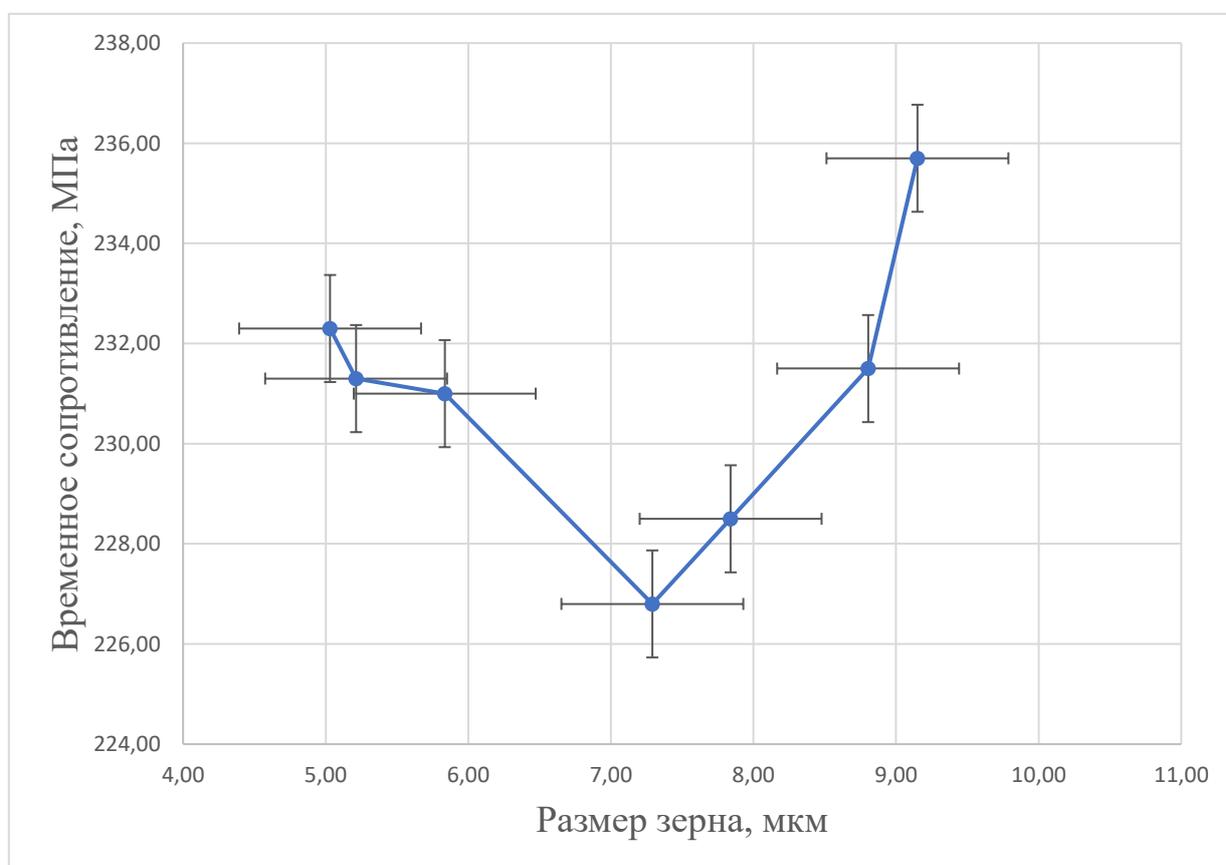


Рисунок 3.4 Отношение временного сопротивления от размера зерна медной катанки

Установлено, что медная катанка с увеличением размера зерна теряет пластические свойства, в частности более показательным значением служит относительное сужение шейки (рисунок 3.5). Относительное удлинение также падает с ростом зерна, что связано с уменьшением длины границ зёрен в стружке меди, но пронаблюдать постоянность данного падение труднее (рисунок 3.6).

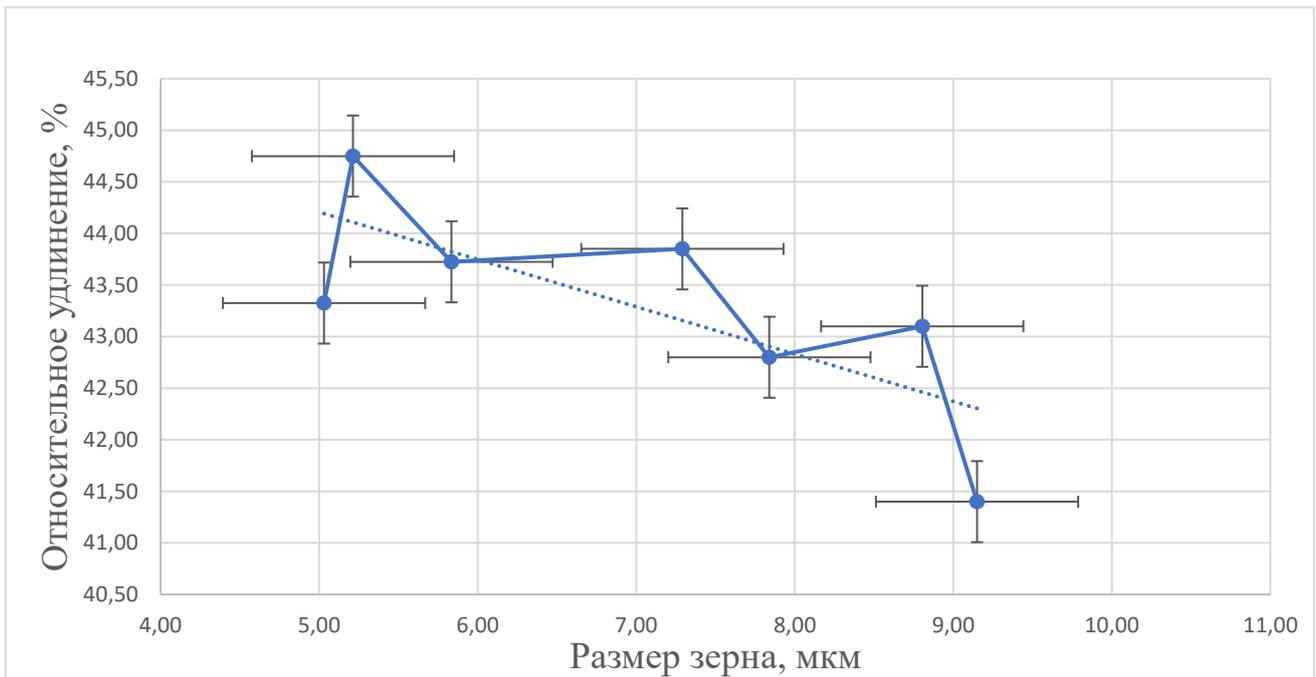


Рисунок 3.5 Зависимость относительного удлинения от размера зерна медной катанки

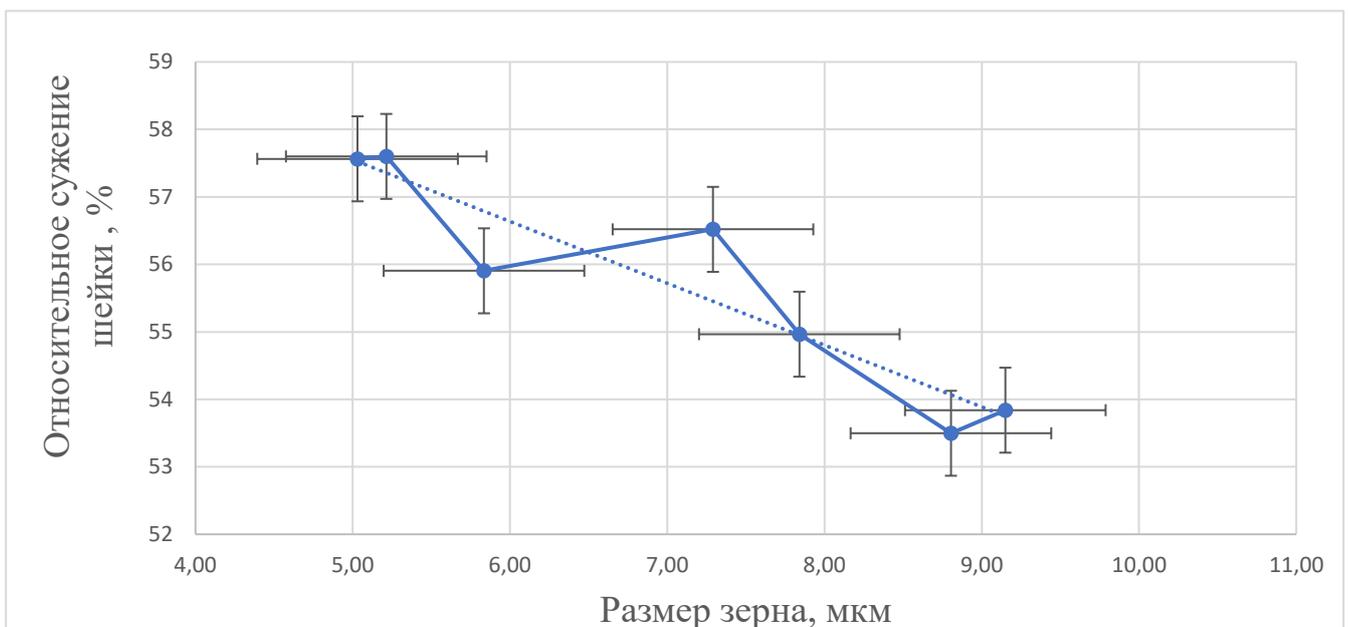


Рисунок 3.6 Зависимость относительного сужения шейки после испытания на разрыв от размера зерна медной катанки

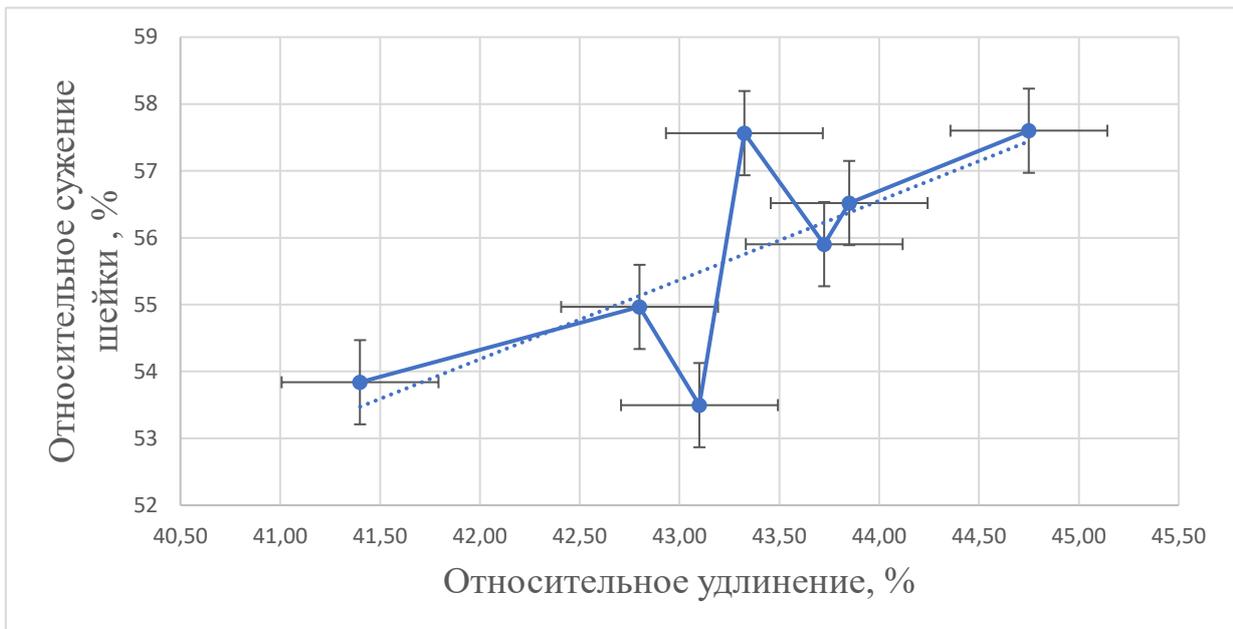


Рисунок 3.7. Зависимость относительного сужения шейки к относительному удлинению медной катанки

Проводя опыт с дополнительными настройками трайб аппарата установлено, что зависимость размера зерна от относительного удлинения отсутствует полностью, что подтверждает рисунок 3.8.

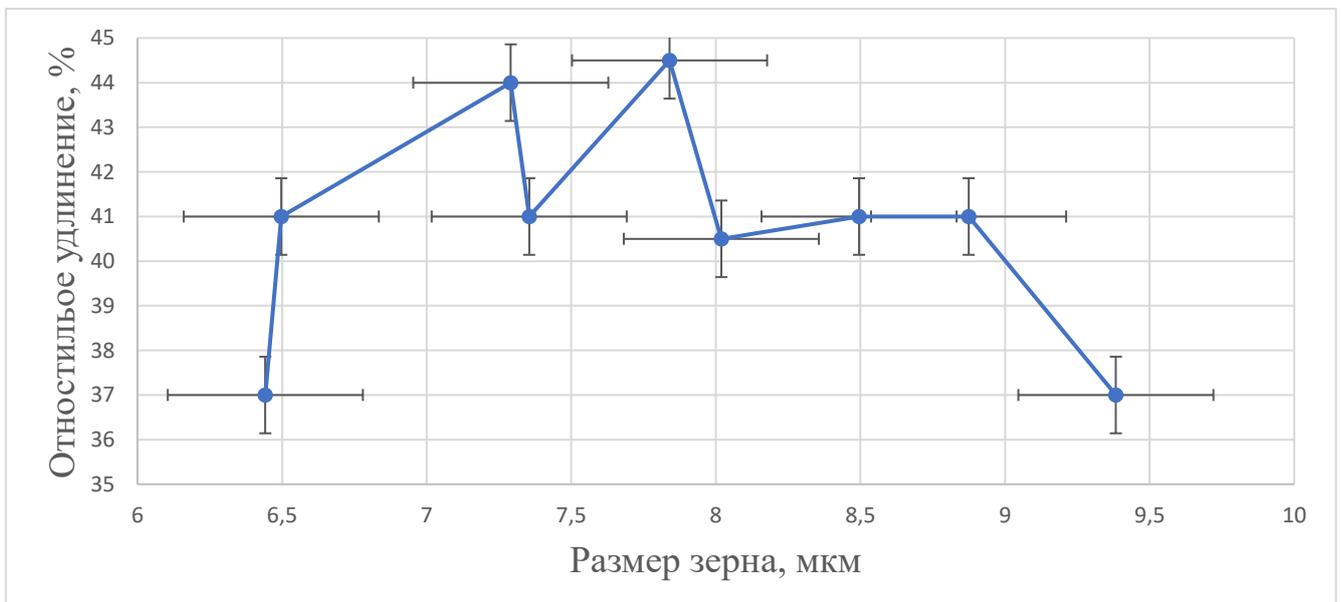


Рисунок 3.8 Зависимость относительного удлинения от размера зерна медной катанки в период дополнительной настройки трайб аппарата

В испытании на снижение скорости охлаждения установлено что размер зерна в поперечном сечении выше, чем в продольном до определённой скорости охлаждения. Можно предположить, что данная скорость охлаждения приходится на температуру осветлителя 47 °С. Также очевиден рост зерна в зависимости от увеличения температуры осветлителя.

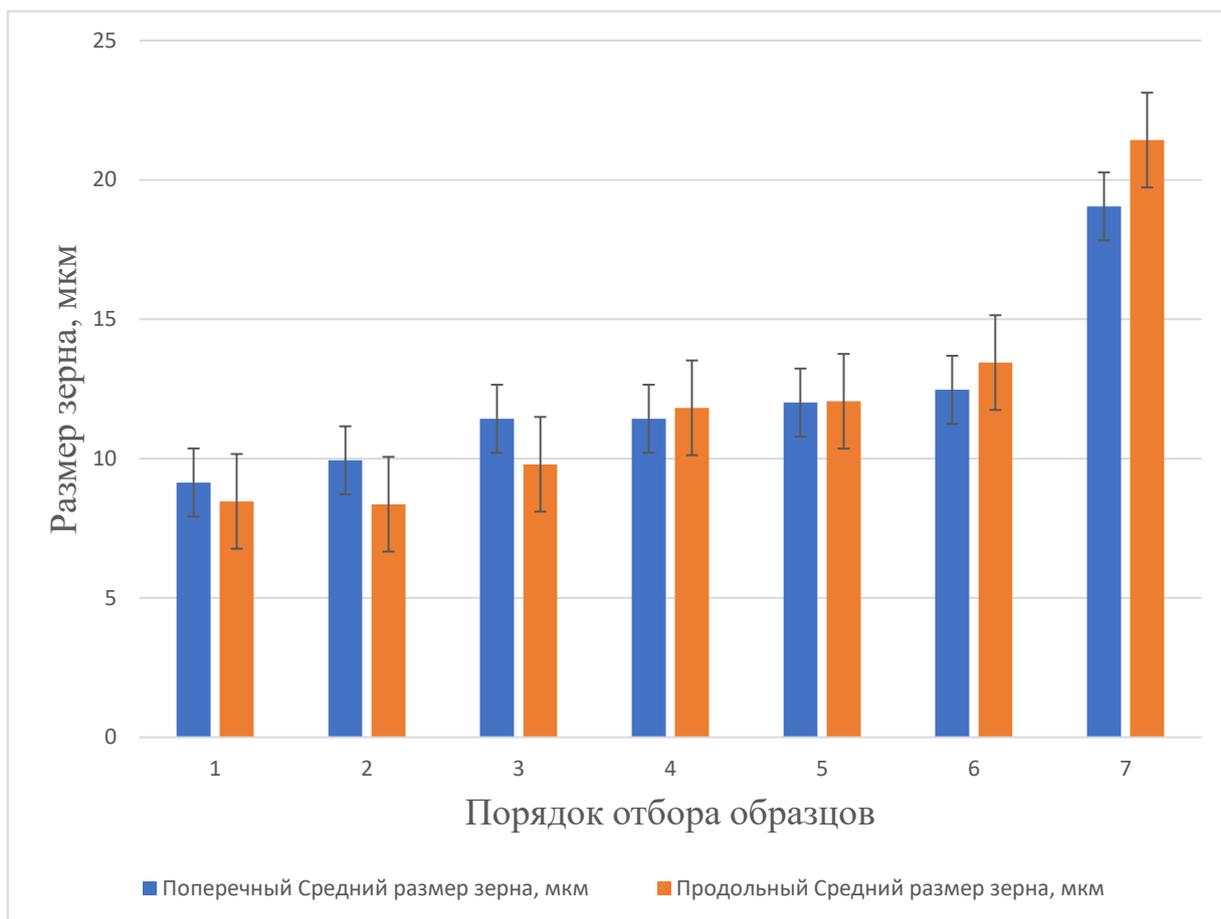


Рисунок 3.9 Изменение размера зерна продольного и поперечного сечения медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

Установлено, что в испытании на уменьшение скорости охлаждения медной катанки, так же, как и при обычных настройках, как и при испытании на введении дополнительной настройки трайб аппарата корреляция относительного удлинения с размером зерна прослеживается очень слабо (рисунок 3.10).

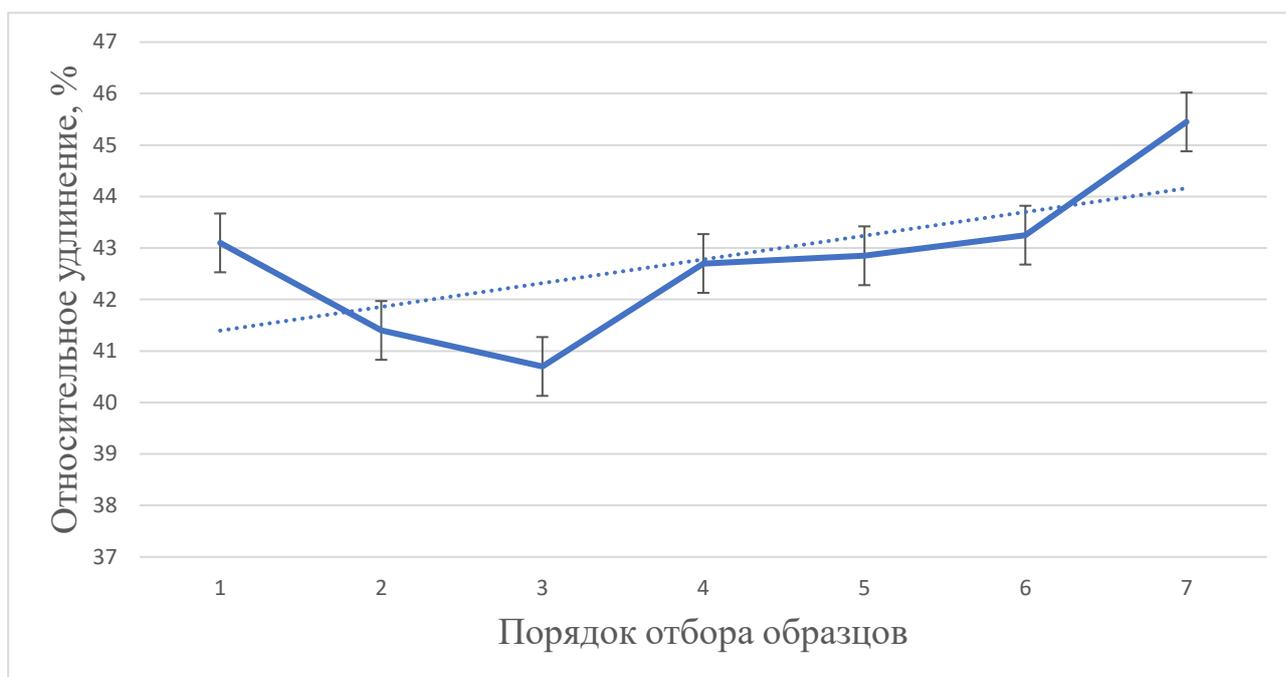


Рисунок 3.10 Изменение относительного удлинения медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

Однако имея высокий разброс размера зерен в последнем испытании отчетливо видно, как размер зерна влияет на такие показатели как временное сопротивление (рисунок 3.11) и условный предел текучести (рисунок 3.12). Особенное внимание обращено на образец под номером 7, где скорость охлаждения была самой низкой, а размер зерна, соответственно самый высокий.

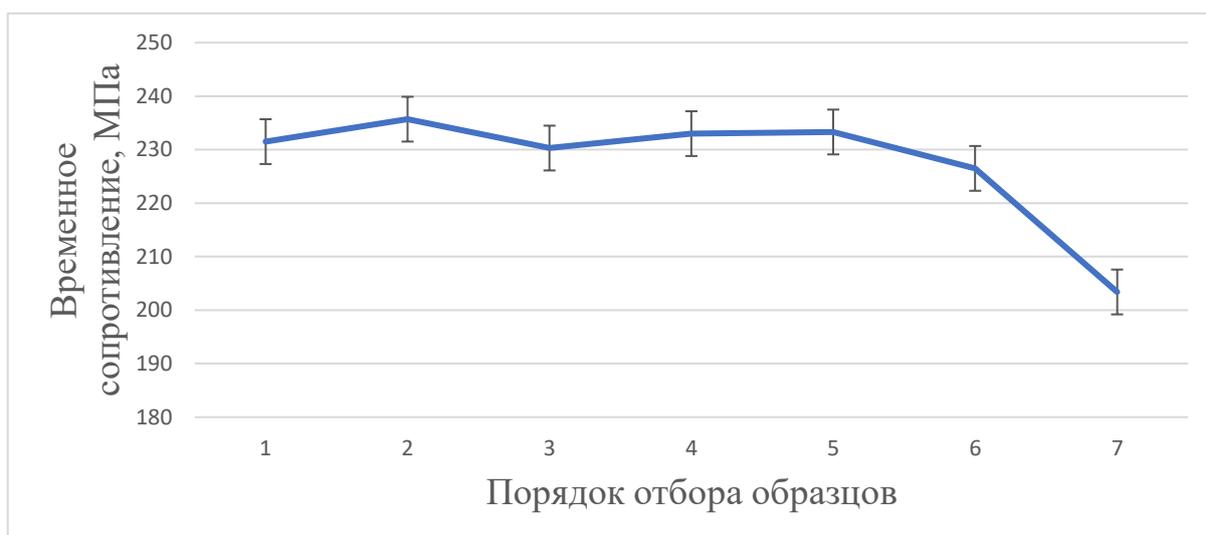


Рисунок 3.11 Изменение временного сопротивления медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

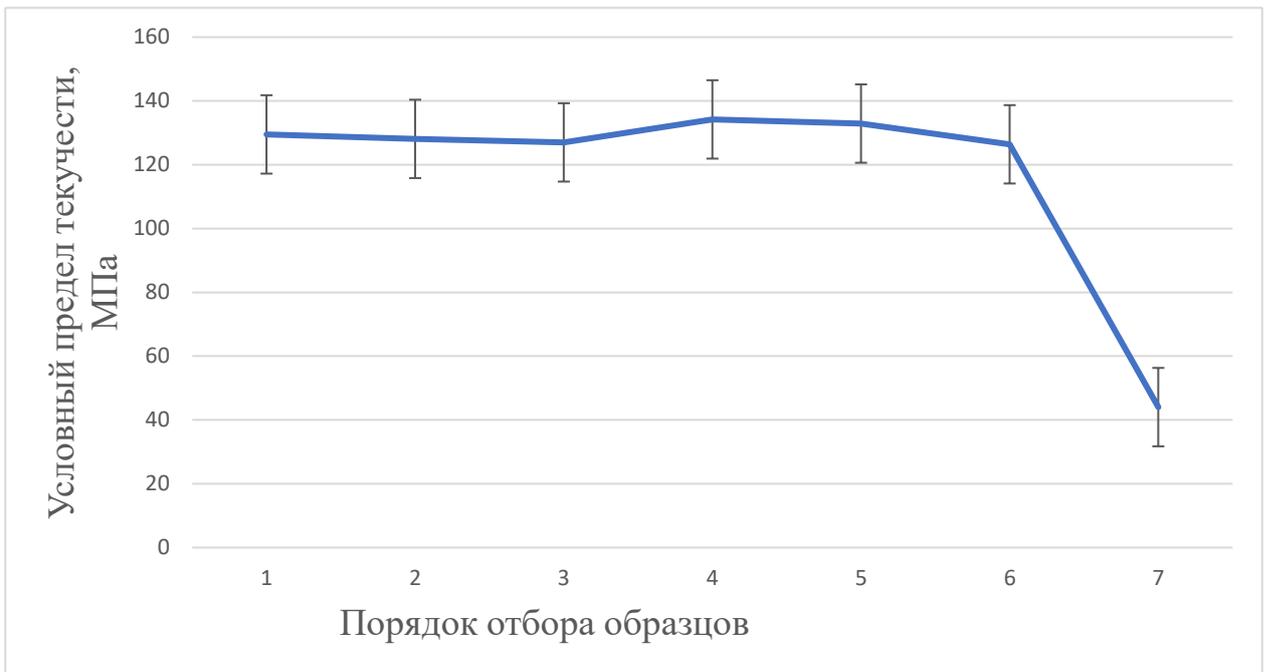


Рисунок 3.12 Изменение условного предела текучести медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

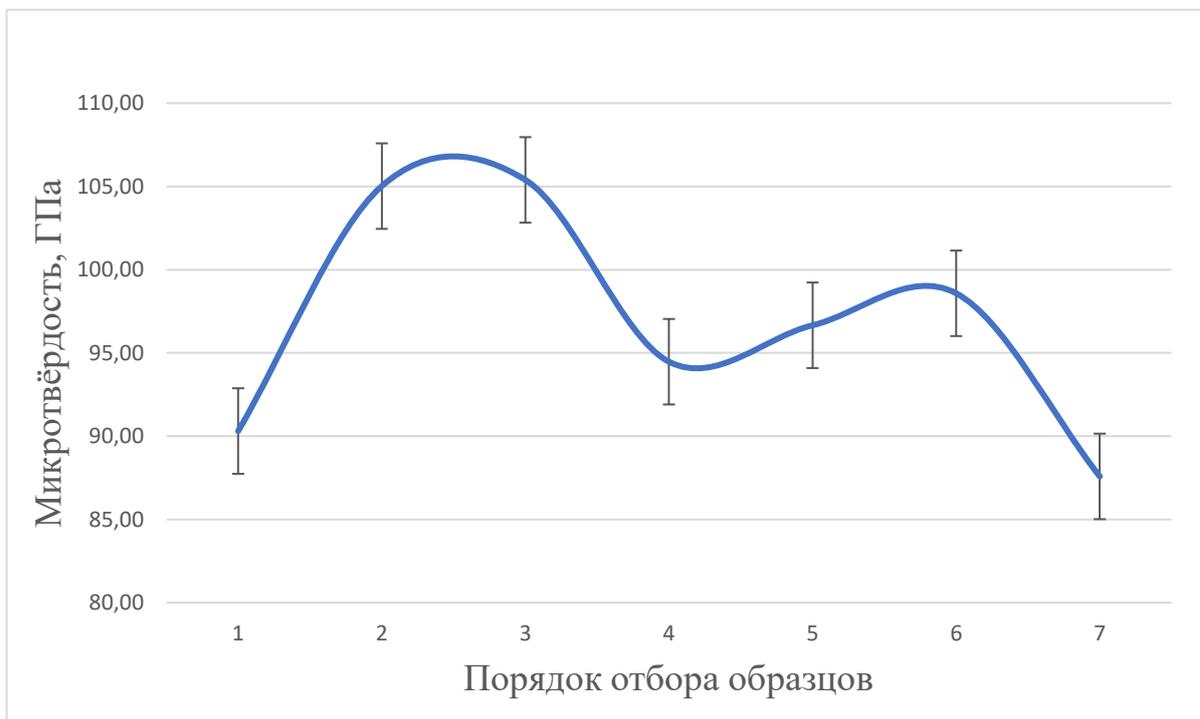


Рисунок 3.13 Изменение показателя микротвёрдости по Виккерсу медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

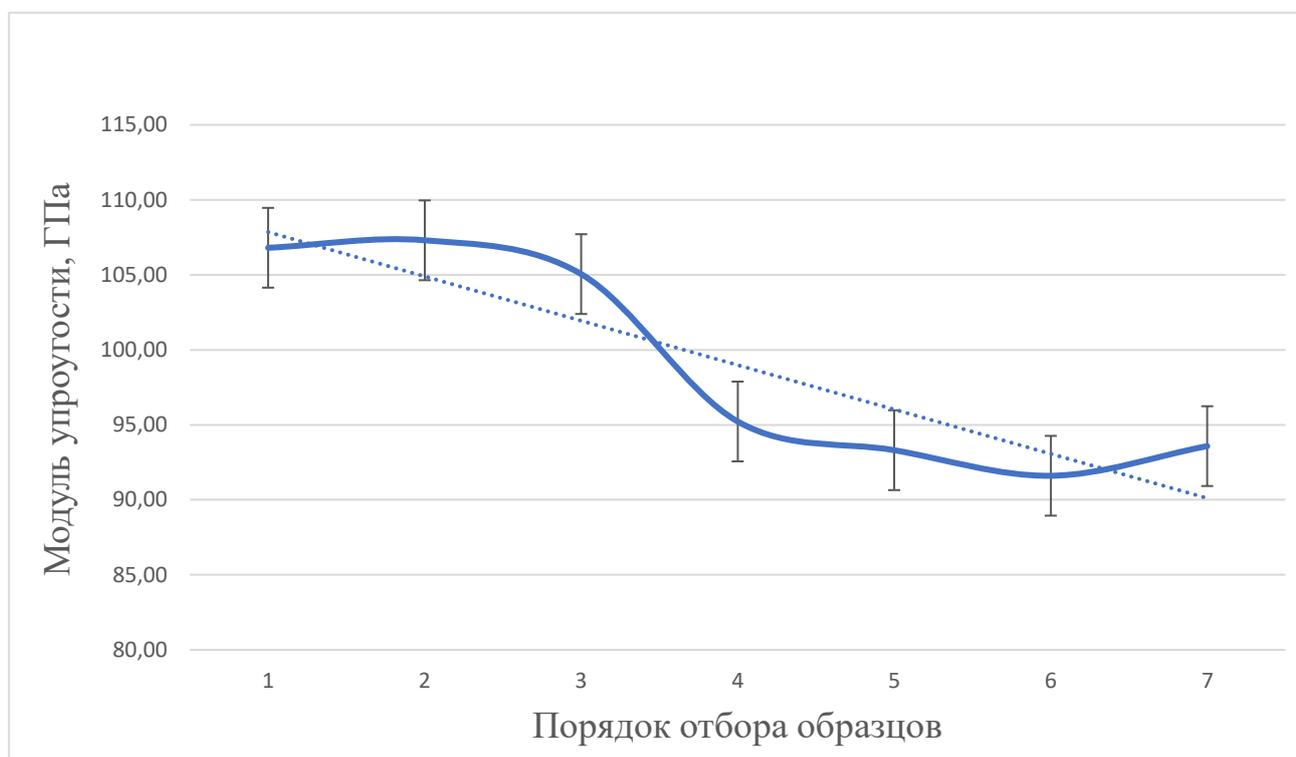


Рисунок 3.14 Изменение модуля упругости медной катанки с уменьшением скорости охлаждения

Установлено, что показатели полученные при микроиндентировании медной катанки также имеют различную корреляцию с размером зерна. Микротвёрдость по Виккерсу, судя по рисунку 3.13 никак от размера зерна не зависит. В свою очередь модуль упругости (рисунок 3.14) имеет отчетливую обратно пропорциональную зависимость и может использоваться в качестве оценочного показателя продукции.

3.4 Выводы

1. Установлено, что при испытаниях катанки предприятия АО «Уралэлектромедь» на пластичность полностью отсутствует постоянство корреляции временного сопротивления от размера зерна. Наиболее показательным являлось относительное сужение шейки, а оно отсутствует в обязательных показателях, измеряемых на всех предприятиях, производящих медную катанку.

2. Показано, что при исследовании микроструктур и свойств медной катанки во время производства с дополнительными настройками трайб аппарата сохраняется низкий уровень постоянства корреляции относительного удлинения от размера зерна, а этот показатель, в свою очередь, является основным при оценке свойств пластичности на производстве.

3. Показано, что при исследовании микроструктур и свойств медной катанки во время производства с постепенным уменьшением скорости охлаждения, а соответственно и увеличением размера зерна, прослеживается прямая зависимость структуры меди от таких показателей как условный предел текучести и модуль упругости, а они отсутствуют в обязательных показателях, измеряемых на всех предприятиях, производящих медную катанку.

4. Определено, что несмотря на одноосную прокатку зёрна медной катанки являются равноосными, а их размер в поперечном и продольном сечениях не имеют существенной и отслеживаемой разницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены эксперименты по изменению параметров работы трайб аппарата и снижению скорости охлаждения на производстве медной катанки, заключающиеся в падении плавности работы трайб аппарата и постепенном увеличении температуры жидкости в линии осветления с 30 до 70°C. Проведены исследования структуры медной катанки в поперечном и продольном сечениях при помощи оптической микроскопии, определены механические свойства.

Полученные данные сравнили с результатами традиционных показателей, полученных при нормальной работе производства медной катанки. Результаты показали, что классическое определение относительного удлинения и временного сопротивления имеет не достаточную показательность при оценке качества медной катанки. Наиболее объективными и имеющими лучшую корреляцию оказались измерения относительного сужения шейки, условного предела текучести и модуль упругости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pops H.C. Copper Applications in Metallurgy of Copper & Copper Alloys / H.C Pops. Innovations, 1997. P 12.
2. Осинцев О. Е. Медь: структура, свойства полуфабрикатов: инженерный журнал. / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров // 2002. № 4. 1-24 с.
3. Уткин Н. И. Metallurgy цветных металлов: учебник / Н. И. Уткин. М.: Metallurgy. 1985. 440 с.
4. Illarionov A.G. Structure and Mechanical Properties of Electrical Copper Wire Processed by Coarse and Medium Drawing / A.G. Illarionova, Yu.N. Loginov, S.I. Stepanov / Materials Science Forum Ural Federal University. Ekaterinburg, 2019. 4 p.
5. Kim W.J. Mechanical properties and microstructure of ultra-fine-grained copper prepared by a high-speed-ratio differential speed rolling / W.J. Kim, K.E. Lee, S.H. Choi / Materials Science and Engineering A. 2009. V.506. P 71–79.
6. Осинцев О. Е. Медь и медные сплавы: справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. М.: Машиностроение. 2004. 336 с.
7. Garcia, V. G. Role of Cu₂O during hot compression of 99.9% pure copper / V. G. Garcia, J. M. Cabrera, J. M. Prado // Materials Science and Engineering A. 2008. V. 488. P. 92-101.
8. Ravichandran N. Influence of oxygen on dynamic recrystallization during hot working of polycrystalline copper / N. Ravichandran, R. K. Prasad // Materials Science and Engineering A. 1992. V.156. No. 2. P. 195-204.
9. Логинов Ю. Н. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Ю. Н. Логинов, С. Л. Демаков, А. Г. Илларионов, М. С. Карабаналов // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 5. С. 38-43.
10. Bigelow L. K. Effects of impurities on the annealability and resistivity of oxygen-bearing copper / L. K. Bigelow, J. H. Chen // Metallurgical Transactions B. 1976. V. 78. P. 661-669.
11. Cho H. Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wiredrawing / H. Cho, H.-H. Jo, S.-G. Lee, Y.-J. Kim // Journal of Materials Processing Technology. 2002. V. 130-131. P. 416-420.
12. Norasethasopon S. Finite-element simulation of inclusion size effects on copper shaped-wire drawing / S. Norasethasopon, K. Yoshida // Materials Science and Engineering. A. 2006. V. 422. P. 252-258.
13. Murr L. E. TEM observations of void-lobed defects and the origin of stringers in copper rod and drawn magnet wire / L. E. Murr, C.-S. Niou, J. T. Farraro, G. Liu, D. Martinez // Materials Research Innovations. – 1997. – P. 26-37.

14. Черемской П. Г. Поры в твердом теле / П. Г. Черемской, В. В. Слезов, В. И. Бетехтин. М.: Энергоатомиздат. 1990. 376 с.
15. Fleck R. G. An investigation of the nucleation of creep cavities by 1 MV electron microscopy / R. G. Fleck, D. M. R. Taplin, C. J. Beevers // *Acta Metallurgica*. 1975. V. 23. P. 415-421.
16. Goods S. H. The nucleation of cavities by plastic deformation / S. H. Goods, L. M. Brown // *Acta Metallurgica*. 1979. V. 27. P. 1-15.
17. Chen L. Research of textures of ultrafine grains pure copper produced by accumulative rollbonding / L. Chen, Q. Shi, D. Chen, J. Wang, X. Luo // *Materials Science and Engineering A*. 2009. V. 508 P. 37-42.
18. Колачев Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник* / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. М.: МИСИС, 2005. 432 с.
19. Ватрушин Л.С. *Бескислородная медь: справочник* / Л. С. Ватрушин, В. Г. Осинцев, А. С. Козырев. М.: *Металлургия*. 1982. 192 с.
20. Бабарэко А. А. *Текстуры металлов и сплавов* / А. А. Бабарэко // *Металловедение и термическая обработка. Итоги науки и техники*. 1967. С. 5-83.
21. Вишняков Я. Д. *Теория образования текстур в металлах и сплавах* / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. М.: *Наука*, 1979. 344 с.
22. ОАО «УГМК». официальный сайт. – URL: <https://www.elem.ru/ru/about-complex/us/> (дата обращения: 19.02.2021). – Текст: электронный. .
23. *Производство медной катанки. ЗАО СП «Катур-инвест»: ТИ 48564189-01-2012*. 2012. 84 с.
24. Бернштейна М. Л. *Металловедение и термическая обработка: справочник в 3 томах. Том 1 Методы испытания и исследования* / М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. М.: *Металлургия*. 1991. 425 с.
25. *ГОСТ 10446-80 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1982-07-01*. М: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 2 с.
26. *ГОСТ Р 8.748-2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. Введ. 2013-05-01* М: *Госстандарт России: Стандартинформ*, 2013. 28 с.
27. Головин Ю. И. *Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках* / Ю. И. Головин // *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50. № 12. С. 30.
28. Головин Ю. И. *Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикроробъемах* / Ю. И. Головин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009. Т. 75. № 1. С. 45–59.

29. Burik P. Effect of Pile-up on the Mechanical Characteristics of Steel with Different Strain History by Depth Sensing Indentation / P. Burik, L. Pesek, L. Volesky // Metal. 2014. P. 5.

30. Степанов Н. Н. Методы исследования материалов и процессов / Н. Н. Степанов. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. 133 с.

31. Юдин Ю. В. Металловедческий эксперимент. Организация, планирование, обработка результатов: учебное пособие / Ю. В. Юдин, М.В. Майсурадзе. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 102 с.