

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы»

(наименование)

22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Современные материалы и технологии их производства»

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему: Анализ причин образования трещин на накидных вилках рулевого механизма

Обучающийся

Н.С. Мелихова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к. ф-м., н., доцент, Л.И. Попова

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа на тему «Анализ причин образования трещин на накидных вилках рулевого механизма» посвящена материаловедческим исследованиям, направленным на установление причин разрушения деталей «вилка» рулевого механизма в процессе их изготовления. Методологический подход к работе и анализ результатов проведенных исследований позволил выдать рекомендации по возможным способам устранения данных причин.

Во введении сформулированы цель работы, последовательность задач для достижения данной цели и дано обоснование актуальности настоящих исследований.

В аналитическом обзоре рассматриваются требования предъявляемые к материалам используемым для изготовления деталей методом чистовой вырубki, особенности и преимущества технологии листовой штамповки, а так же технология изготовления деталей «вилка» рулевого механизма.

Второй раздел посвящен методическому обоснованию проведения работы, выбору методов исследований и соответствующего испытательного оборудования.

В третьем разделе настоящей работы представлены результаты макро- и микроскопических исследований структуры, измерения твердости, комплексный анализ результатов экспериментальных исследований.

В заключении сформулированы выводы и выданы рекомендации по устранению причин образования трещин в исследуемых конструктивных элементах.

Дипломная работа состоит из пояснительной записки на 50 страницах, где представлены 22 рисунка и 10 таблиц со справочными и экспериментальными данными.

Содержание

Введение.....	4
1 Аналитический обзор.....	6
1.1 Сущность технологии листовой штамповки и основные типы производственных процессов листовой штамповки.....	6
1.2 Технология изготовления деталей «вилка» рулевого управления.....	7
1.3 Материалы, используемые для изготовления деталей методом чистовой вырубки и требования, предъявляемые к ним.....	12
2 Методическое обоснование проведения работы.....	18
2.1 Методологические основы работы.....	18
2.2 Обоснование выбора методик испытаний.....	19
2.3 Обоснование выбора оборудования.....	23
3 Результаты испытаний и исследований.....	32
3.1 Результаты макроскопического анализа заготовок.....	32
3.2 Результаты металлографического анализа и испытаний на твердость.....	38
Заключение.....	47
Список используемой литературы.....	48

Введение

Листовая штамповка широко используется при изготовлении деталей в автомобильной промышленности. Примером таких деталей являются вилка накидная, шлицованная или приварная карданного шарнира, которые и являются объектом исследования настоящей работы. Основными формообразующими операциями изготовления исследуемой детали являются чистовая вырубка и гибка. Метод чистовой вырубки изготовления деталей является современным, высокопроизводительным и перспективным. Этот метод хорошо автоматизируется и обеспечивает высокую чистоту поверхности среза, поэтому после чистовой вырубки не требуется дополнительная механическая обработка деталей. Однако, для обеспечения высокого качества деталей и обеспечения стойкости инструмента необходимо, чтобы металл соответствовал требованиям предъявляемым к материалам для чистовой вырубки и имел соответствующие показатели штампуемости. Для операций «гибка» заготовки должны обладать определенным запасом пластичности.

На ОАО «АвтоВАЗ» выявлена проблема при изготовлении данного конструктивного элемента. В процессе изготовления «вилки» при гибке или последующей операции сверления обнаруживаются неисправимые дефекты в виде трещин, надрывов, расслоения металла, которые, в последствии, могут приводить к полному разрушению детали. Конструктивные элементы с такими недопустимыми дефектами являются браком.

Устранение причин появления недопустимых дефектов в деталях «вилка» карданного вала и является целью настоящей работы.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- изучить технологию изготовления деталей «вилка» и оценить соблюдение и соответствие технологических параметров обработки техническим условиям;
- провести анализ специальной литературы по настоящей проблеме;

-исследовать микроструктуру, химический состав, механические свойства сталей 08Ю и 08пс, из которых изготавливается «вилка» и выявить возможные отклонения от требований, предъявляемым к сплавам для изготовления деталей методом листовой штамповки;

-провести анализ результатов исследований и выявить причину образования дефектов;

-опираясь на литературные данные, знания технологических процессов изготовления и результаты исследований, сформулировать рекомендации о внесении изменений в технологический процесс, с целью устранения неисправимого брака.

Актуальность настоящей работы заключается в решении конкретной производственной проблемы. Устранение причин появления трещин и разрушения деталей вилка в процессе их изготовления повысит производительность, даст значимый экономический эффект, позволит исключить нарекания и рекламации со стороны потребителей и будет способствовать повышению престижа отечественного автопрома.

1 Аналитический обзор

1.1 Сущность технологии листовой штамповки и основные типы производственных процессов листовой штамповки.

Технологический процесс листовой штамповки – это совокупность способов формообразования изделий за счет обработки давлением в специальных инструментах, называемых штампами. Листовая штамповка предполагает изготовление деталей из листовых полуфабрикатов и является очень распространенным способом ОМД благодаря своей высокой производительности, обеспечения высокой точности размеров деталей и автоматизации технологических процессов [3].

Листовая штамповка позволяет изготавливать детали в широком размерно-массовом диапазоне, от граммов до десятков килограммов.

Изделия после листовой штамповки обладают повышенной прочностью вследствие деформационного упрочнения. Листовая штамповка широко используется в производстве деталей автомобилей, судов, авиационных аппаратов и в приборостроении. Кроме классических методов листовой штамповки в настоящее время разработаны оригинальные современные способы [3], такие как, механо - гидравлическая с применением ударной волны; штамповка магнитными импульсами, где используется взаимодействие между вихревыми токами, возникающими в поверхностном слое заготовки и магнитным импульсным полем; штамповка взрывом, при которой реализуется механизм пластической деформации теоретической прочности и не происходит деформационного упрочнения.

Изготовление деталей, как правило, происходит путем воспроизведения нескольких технологических операций.

Перечислим основные операционные группы метода листовой штамповки:

-разделительные операции, подразумевающие разрушение заготовки в ходе технологического процесса, такие как вырубка, пробивка, высечка, отрезка и тому подобные операции;

-формообразующие операции, которые предполагают изменение формы и размеров заготовки за счет пластического деформирования без разрушения;

-прессовочные;

-комбинированные;

-штамповочные.

К формообразующим операциям относят гибку, вытяжку, отбортовку, обжим и другие. Для данной группы операций важным свойством материала является штампуемость, непосредственно связанная со способностью материала к пластической деформации и зависящая от химического состава и микроструктуры сплава.

1.2 Технология изготовления деталей «вилка» рулевого управления.

Производство деталей «вилка» рулевого управления проводят методом чистовой вырубки, в соответствии с разработанным технологическим процессом, включающим в себя определенную последовательность технологических операций, приведенных в таблице 1.

В настоящее время на АО АВТОВАЗ в прессовом производстве действует специализированный производственный участок чистовой вырубки деталей автомобилей ВАЗ, оснащенный комплексом оборудования для выполнения полного технологического цикла изготовления деталей. На производственном участке чистовой вырубки осуществляется изготовление более 150 наименований деталей из полосового или ленточного металлопроката из углеродистых и легированных сталей. Основная операция вырубки проводится на специализированных пресс-автоматах тройного

действия с гидравлическим приводом, зарубежных и Российских изготовителей.

Таблица 1-Технологический маршрут изготовления дет.2108-3401098 «вилка»

№ операции	Наименование операции	Оборудование
10	Штамповка (вырубка)	Пресс-автомат "Файнтул"
20	Зачистка заусенцев	Шлифовальный станок
30	Мойка заготовок	Моечная машина
40	Отжиг заготовок	Печь "Хумберт"
50	Галтовка заготовок	Галтовочный барабан
60	Гибка первая и вторая	Пресс механический КД 2330
70	Гибка третья	то же
80	Гибка четвертая	"-"
90	Гибка пятая и правка	"-"
100	Контроль	Калибр контрольный

Автоматизация штамповки возможна благодаря оснащению прессов вспомогательными устройствами - рулонницами и полосоукладчиками, механизмами подачи полосы (клещевого типа) и разрезки полосы после штамповки, системами удаления деталей и отходов из штампового пространства. Прессы имеют массивную, высокой жесткости станину замкнутого типа с четырьмя симметрично расположенными колоннами, связывающими основание и верхнюю часть (траверсу) прессы. Даже при высоких усилиях штамповки упругие деформации прессы в продольном и поперечном направлениях - минимальны. Точность хода ползуна гарантируется за счет применения 4-х пар бронзовых направляющих.

Выбор прессов для чистовой вырубки (штамповки) производится по величине требуемого для штамповки усилия, в зависимости от материала и геометрии детали [14]. Гамма прессов, используемых на ВАЗе, обеспечивает усилия при штамповке от 250 до 800 тс.

Для чистовой вырубки применяют штампы повышенной точности со сферическими (плавающими) хвостовиками. Направление движения опорных

плит штампов и, соответственно, точность направления рабочих частей штампов обеспечиваются с помощью шариковых направляющих.

Для повышения стойкости дорогостоящих штампов при чистовой вырубке обязательно является применение технологической смазки, что исключает схватывание (агдезию) штампуемого металла с поверхностью инструмента, улучшает качество поверхности среза. На ВАЗе применяется смазка "Куртис" (Швейцария), обладающая наилучшими свойствами. Из отечественных приемлемыми являются смазки типа ХС-163.

Чистовая вырубка осуществляется по технологии совмещенной и/или последовательной (многопозиционной) штамповки в автоматическом режиме. Штамповка (вырубка) простых плоских деталей с отверстиями производится, как правило, в однопозиционных комбинированных штампах совмещенного действия (рис.5); деталей сложной геометрии (требующих формообразующих операций - гибки, вытяжки, отбортовки и др.) - в многопозиционных комбинированных штампах последовательного действия (прогрессивных штампах) за 3-5 переходов.

Для особо сложных деталей, требующих глубокой вытяжки, гибки на минимальный радиус проводится промежуточный отжиг после вырубки заготовок (для снятия наклепа поверхности реза и повышения пластических свойств).

Важную роль для обеспечения качества деталей, получаемых методом чистовой вырубки, и стойкости штампов играют геометрические параметры деталей (радиусы закруглений, величины перемычек, соотношения диаметров отверстий и толщины, длина и ширина пазов и др.), которые должны отвечать требованиям технологичности. Схематичные изображения деталей штампуемых, в прессовом производстве показаны в таблице 1.

Анализ конструкций деталей показал, что размеры и соотношения размеров элементов деталей отвечают предъявляемым требованиям:

- наименьшие размеры элементов деталей (h) не превосходят $2S$;
- наименьшие радиусы сопряжений $R > 0,5S$;

- минимальные размеры отверстий $D > 1,5S$;
- наименьшие расстояния между отверстиями $m > S$;
- допуски на отклонения размеров не менее $\pm 0,05$ мм;
- шероховатость поверхности реза не выше $R_z = 1,6-6,3$ мкм;
- минимальные относительные радиусы при гибке поперек волокон (сталь 20) $R/S > 0,5$; при гибке вдоль волокон (сталь 20) $R/S > 1,3$.

Изготовление деталей чистовая вырубка занимает одно из ведущих мест, удачно сочетая преимущества методов обработки металлов давлением (высокие экономичность, производительность, технологические возможности) и механообработки (высокие точность форм и размеров, высокое качество обработки).

Из большого разнообразия способов чистовой вырубки широкое применение нашел способ, по которому можно за одну операцию на штампе получить вырубкой из листа точные по форме и размерам детали с идеально гладкой поверхностью среза. В комбинации с другими формообразующими операциями (гибка, чеканка, высадка) чистовая вырубка позволяет изготавливать детали, готовые к сборке. Какая-либо дополнительная обработка деталей резанием при этом, как правило, исключается вместе со всеми производственными затратами на последующую доработку деталей механообработкой.

Применение этого метода обработки по сравнению с традиционными методами обеспечивает в производстве экономию материала, снижение трудозатрат, увеличение производительности и улучшение качества деталей. При этом из технологического процесса исключаются дорогостоящее металлорежущее оборудование, освобождаются значительные производственные площади, сокращается высококвалифицированный рабочий персонал. Особенно эффективен метод в крупносерийном и массовом производстве при изготовлении геометрически сложных деталей из толстолистовых сталей повышенной прочности.

Сущность и отличительная особенность процесса чистовой вырубки заключаются в воздействии высокого давления на заготовку и изменении схемы напряженного состояния металла в зоне резания, что обеспечивает получение чистой, гладкой поверхности среза с шероховатостью не выше $Ra=1,25-0,63$ мкм, высокой точности формы и размеров деталей. Напряженное состояние всестороннего сжатия в зоне реза создается с одной (внутренней) стороны линии разделения за счет сжатия внутренней части заготовки пуансоном и контрпуансоном, и, с другой (наружной) стороны линии реза - за счет внедрения в материал заготовки технологического клиновидного ребра (зубца). При вдавливании пуансона в заготовку вытесняемый из-под пуансона металл испытывает подпирющее воздействие (давление) со стороны сжатых боковых частей заготовки, что увеличивает напряжение объемного сжатия и пластические свойства материала, исключает образование растягивающих напряжений вплоть до окончания процесса резания и обеспечивает гладкую без следов разрушения поверхность разделениях [15]. Благодаря высокоточному исполнению размеров пуансона и матрицы, уменьшенному зазору между режущими кромками обеспечивается точность размеров вырубаемой детали.

Однако, в результате операции вырубки происходит упрочнение материала заготовки в областях прилегающих к линии среза [3, 19]. Это может в дальнейшем затруднять последующие операции формообразования, связанные с пластической деформацией. Поэтому после вырубки часто применяют промежуточную термическую обработку – рекристаллизационный отжиг, с целью снятия наклепа, исключения остаточных напряжений и обеспечения максимальной пластичности материала [9].

Метод нашел широкое применение во многих отраслях промышленности, в том числе на Волжском автомобильном заводе (ВАЗ). Ведущая роль в расширении области применения и развитии технологии принадлежит фирме "Файнтул" (Швейцария). Эффективность процессов чистовой вырубки в производстве определяется наличием 3-х основных

компонентов: специального прессового оборудования, высокоточной штамповочной оснастки и высокопластичных материалов для изготовления деталей, а также системой обеспечения их «жизнедеятельности»: инженерно-техническое обслуживание оборудования, разработка и воспроизводство штамповой оснастки, бесперебойное обеспечение качественными материалами.

Высокие требования к металлопрокату для чистовой вырубки предъявляются по качеству поверхности и геометрическим параметрам. Важными показателями металлопроката являются толщина и ширина полосы, плоскостность и прямолинейность [1,15]. При соблюдении требований по параметрам геометрической точности готовые отштампованные детали не нуждаются в шлифовке и дополнительной правке. Допускаемые отклонения по толщине проката должны быть в пределах 0,20 мм, по ширине -2,0 мм; ребровая кривизна и неплоскостность не должны превышать 2 мм на длине 1000 мм. Согласно требованиям технологии чистовой вырубки поверхность проката должна быть чистой, гладкой, без трещин, плен, расслоений.

1.3 Материалы, используемые для изготовления деталей методом чистовой вырубки и требования, предъявляемые к ним.

Технологичность деталей и итоговое качество изделий, формообразование которых происходит методом чистовой вырубки при совмещении с операциями гибка, отбортовка и т.п., зависят не только от конструкции и геометрии изделия, но и от способности материала к пластической деформации в конкретных условиях операции штамповки.

Неравномерность пластической деформации и особенности течения металла в полуфабрикате влекут за собой возникновение сложно-напряженного состояния, характеризующегося наличием как растягивающих так и сдвиговых напряжений. Величина этих напряжений может привесить

допустимые значения, результатом чего может стать образование различного вида сплошностей: микротрещин, сколов, разрывов.

В зависимости от способа и условий нагружения, показателями деформируемости сплавов могут служить такие механические характеристики сплавов как относительное сужение и удлинение, предел текучести, сопротивление срезу, а так же вид разрушения –вязко-хрупкий, вязкий, смешанный и т.п. [9].

При внедрении технологии чистовой вырубки в производство на АО АВТОВАЗ, были проведены специальные исследования и определены показатели штампуемости для малоуглеродистых (08, 08Ю, 10) и низколегированных (12ХН, 07ГБЮ) сталей. В основном, пластичность сталей оценивалась по результатам испытаний на одноосное растяжение до разрыва. Анализ экспериментальных данных позволил установить значения критериев штампуемости исследованных марок сталей именно для операций чистовой вырубки, которые приведены ниже и которые хорошо согласуются с литературными источниками [15].

Это – максимальная твердость 180 НВ; отношение временного сопротивления к физическому или условному пределу текучести ($\sigma_v/\sigma_T \leq 0,8$; $\Psi \%$ (относительное сужение) $\geq 50\%$; $d\%$ (относительное удлинение) $\geq 20\%$.

Уровень вышеназванных механических характеристик стального холоднокатанного и горячекатаного металлопроката (полосы и ленты) обеспечивается выбором оптимальных технологических режимов металлургического передела: допусками по химическому составу, скоростью и температурой прокатки, скоростью охлаждения, режимами термической обработки.

Согласно проведенным исследованиям и литературным данным качество поверхности среза изделия зависит не только от пластичности металла, и условий пластической деформации, но и от микроструктуры сталей. Низкоуглеродистые стали, повышенной пластичности абсолютно пригодны для чистовой вырубки. Но с повышением содержания углерода более 0,15% и

повышением содержания легирующих элементов важное значение приобретает количество, распределение и форма карбидов в стали. Для сталей с повышенным содержанием углерода и феррито-перлитной структурой наилучшей структурой для чистовой вырубки является структура с зернистым перлитом. Наличие в структуре крупных пластинок карбидов, видманштеттова феррита или цементита значительно снижают показатели пластичности металла, и что не менее важно, способствуют снижению стойкости инструмента, уменьшают длительность его эксплуатации, отрицательно сказываются на качестве поверхности среза. Если структура стали содержит пластинчатый перлит, то при вырубке инструмент перерезает длинные твердые пластинки цементита и в этом случае происходит разрушение режущих кромок инструмента за счет выкрашивания.

С теоретической точки зрения в процессе пластической деформации разрушение цементита возможно по двум механизмам- это разрезание и растворение.

Разрушение цементных пластин путем растворения происходит за счет выноса дислокациями при их движении атомов углерода из цементита в феррит. Процесс сопровождается образованием наноразмерных частиц цементита в ферритных зернах. Этот механизм возможен в результате дестабилизации деформированного цементита и большей энергии связи между атомами углерода и дислокациями, в сравнении с величиной энергии связи атомов углерода в кристаллической решетке метастабильного деформированного цементита [8,20].

В литературных источниках, рассматривающих качество стального проката, неоднократно упоминается и отрицательное воздействие структурной сетки третичного цементита, наличие которой в низкоуглеродистых сталях снижает качество поверхности деформируемых изделий и даже приводит к полному разрушению материала. Структурно-свободный или так называемый третичный цементит можно наблюдать по границам ферритных и перлитных зерен. Третичный цементит является

дефектом структуры, снижающим способность стали к холодной деформации [1]. Третичный цементит формируется в процессе старения феррита. Он имеет незначительный объем и сложно дифферируется в оптический микроскоп, для его качественного обнаружения необходимо применять специальные методы травления и микроскопического анализа [2]. Таким образом, структура стали не должна содержать сетку (скопления) свободного цементита по границам зерен [5]. Проблема состоит в том, что структурно-свободный цементит оценивается по ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металлографический способ оценки микроструктуры листов и ленты». Однако, данный документ только дает возможность оценить структуру по баллам, согласно приведенным шкалам, но не регламентирует возможность использования стали с такой структурой [6]. Поэтому практически невозможно предъявить претензии предприятию - поставщику. Для гарантированного отсутствия сетки структурно-свободного цементита на машиностроительном производстве применяют специальный отжиг.

Следующим важным показателем микроструктуры, влияющим на штампуемость и качество поверхности деталей, является балл ферритного зерна [7]. Мелкозернистый металл с баллом зерна от 6 до 9 штампуется наиболее хорошо. Удовлетворительную штампуемость имеет сталь с баллом зерна от 5 до 6 номера [15]. Если зерно более крупное, то при штамповке часто проявляются всевозможные дефекты, особенно так называемая «апельсиновая корка». Если в структуре наблюдается разнотекстурность, то и пластическая деформация и упрочнение и распределение остаточных напряжений будут неравномерными, а это в дальнейшем так же может привести к дефектам и разрушению. Максимально допустимые отклонения по размеру ферритного зерна в малоуглеродистых сталях составляют не более трех баллов для процессов чистовой вырубki.

Для обеспечения мелкозернистой структуры и глобулярного цементита (как правило частично) на заводах-изготовителях прокат подвергают термической обработке, вид и технологические параметры которой зависят от

марки стали, условий деформации и сформировавшейся структуры и требуемых свойств после термической обработки. Например, для холоднокатанной стали применяют неполный отжиг, как промежуточную термическую обработку. Холодно –деформируемый металл, в отличие от горячекатанного имеет более измельченную карбидную фазу, которая и легче сфероидизируется и более благоприятна для последующего рекристаллизационного отжига [17]. Для горячекатаных полуфабрикатов применяют полный отжиг или нормализацию. Полная фазовая перекристаллизация и ускоренное охлаждение при нормализации способствуют измельчению зерна, устраняют полосчатость и другие неоднородности микроструктуры сталей.

Для повышения производительности и обеспечения мелкого зерна тонко - листового проката в настоящее время широко используют контролируемую прокатку [17]. Данный способ является одним из видов высокотемпературной термо - механической обработки, схема которой приведена на рисунке 1. За счет полной фазовой перекристаллизации измельчается аустенитное зерно [9,17]. Пластическая деформация проводится в аустенитной области со степенью 20 и более %. Формирование конечной структуры происходит при наличии повышенной плотности дислокаций, двойников, субзеренных границ, что способствует зарождению большого числа центров кристаллизации новых фаз при распаде аустенита. Технологические режимы прокатки и последующего охлаждения позволяют формировать мелкозернистую структуру с заданным распределением упрочняющих фаз, обладающую и повышенной прочностью и высокими пластическими свойствами.

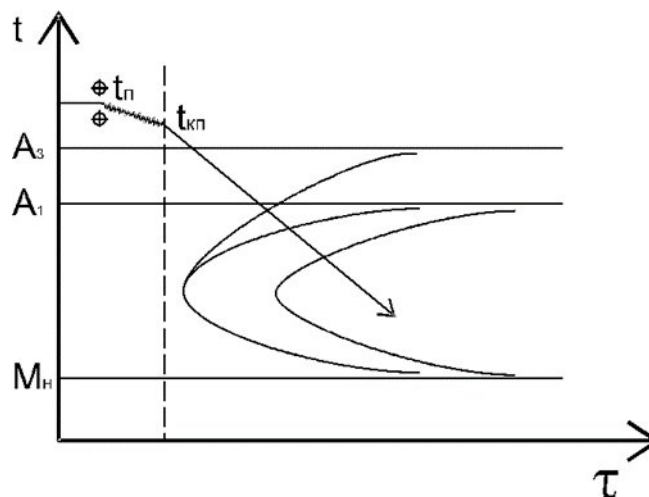


Рисунок 1 - Схема контролируемой прокатки

Для обеспечения высокого качества деталей, обеспечения стойкости рабочих деталей штампов при чистовой вырубке необходимо использовать стали с ограниченным содержанием кремния, серы и фосфора, количество которых регламентируется ГОСТом на химический состав качественных конструкционных сталей, то есть максимальное содержание серы и фосфора допускается до 0,04%. Кремний значительно упрочняет феррит, снижает вязкость и пластичность сталей очень сильно, соответственно важно ограничить его количество.

Анализ специальной литературы позволяет утверждать, что метод чистовой вырубки изготовления деталей является современным, высокопроизводительным и перспективным, обеспечивает высокую чистоту поверхности среза, поэтому после чистовой вырубки не требуется дополнительная механическая обработка деталей.

Для обеспечения высокого качества деталей «вилка» и обеспечения стойкости инструмента необходимо проверить:

- соблюдение технологии изготовления;
- соответствие проката требованиям по геометрическим параметрам;
- соответствие химического состава и структуры металлопроката предъявляемым требованиям;
- показатели штампуемости (механические характеристики).

2 Методическое обоснование проведения работы

2.1 Методологические основы работы

Важным аспектом успешного выполнения научных исследований является методологический подход, который позволяет систематически и последовательно организовать процесс работы. Ключевыми методами являются анализ, синтез, индукция, дедукция, моделирование и оптимизация. Каждый из этих методов играет свою уникальную роль в процессе исследования, обеспечивая структурированный подход к решению задач. Анализ позволяет студентам разбивать сложные системы на более простые компоненты, что способствует лучшему пониманию их функциональности и выявлению проблем. Синтез, в свою очередь, помогает объединять эти компоненты в целостные решения, учитывая взаимодействие и взаимозависимость элементов. Индукция и дедукция обеспечивают логическую основу для формулирования гипотез и теорий, что является критически важным в научной работе. Методологический подход не только улучшает качество исследований, но и развивает навыки системного мышления. В условиях быстро меняющегося технологического мира, умение применять различные методологические приемы позволяет будущим инженерам и ученым эффективно адаптироваться к новым вызовам и задачам. Это особенно важно в технических науках, где инновации и новые технологии требуют от специалистов способности к быстрому анализу и принятию решений. Кроме того, использование методологических приемов способствует повышению уровня научной работы. Таким образом, методологический подход в научной работе играет ключевую роль в формировании профессиональных навыков и компетенций. Он обеспечивает системность, логичность и эффективность исследований, что, в свою очередь, способствует успешной карьере в области науки и техники.

На основании литературного обзора, первичной информации о проблеме сформируем методологические основы работы. Основой для данного раздела являются цель и сформулированные задачи. Поскольку основной проблемой является образование трещин (разрушение) изделий, то в качестве основного методологического приема выбираем метод сравнения. Здесь под методом сравнения подразумеваем оценку двух или более объектов, процессов или систем для выявления их сходств и различий. Это позволит выбрать наиболее эффективные решения или технологии, а также понять преимущества и недостатки различных подходов. Логично провести сравнение состояния автокомпонентов с дефектами и без трещин. Для понимания проблем функционирования воспользуемся анализом проблемных деталей. Самым простым подходом в этом случае будет провести испытания на соответствие требований технической документации: чертежа и технологического процесса изготовления.

2.2 Обоснование выбора методик испытаний

Для обнаружения дефектов поверхности в виде трещин на практике, как правило, используют визуальный осмотр поверхности деталей с применением небольшого увеличения до 50 крат. Визуальный осмотр самый простой метод, который позволяет быстро выявить явные дефекты, такие как трещины. Однако этот метод ограничен в способности обнаруживать скрытые дефекты. В случае необходимости, когда выявление дефектов сопряжено с трудностями применяют горячее макротравление в соляной кислоте. Методический подход подробно описан в ГОСТ 10243.

В чертеже и в технических условиях на поставку оговаривается твердость детали и проката соответственно, измеренная в единицах HRB. Метод испытания твердости Rockwell шкала В (HRB) является популярным выбором для оценки твердости изделий из листового проката толщиной 6 мм по нескольким важным причинам. Во-первых, HRB предназначен для

материалов с низкой и средней твердостью, что делает его идеальным для большинства листовых металлов, таких как малоуглеродистые стали. Это обеспечивает точные и воспроизводимые результаты, необходимые для контроля качества. Во-вторых, метод HRB использует относительно небольшую нагрузку, обычно 100 кг. Это существенно снижает риск повреждения или деформации тонких изделий, что крайне важно для сохранения их эксплуатационных характеристик. Кроме того, процесс испытания HRB является быстрым и простым, что позволяет получать результаты в короткие сроки. Это особенно актуально в производственных условиях, где время играет ключевую роль. Метод также удобен для работы с небольшими образцами, что позволяет проводить испытания на различных участках листа и получать более полное представление о его свойствах. Кроме того, результаты, полученные с помощью HRB, легко сопоставимы с другими стандартами твердости, что упрощает анализ и оценку качества материалов.

Метод Роквелла наименее трудоемок и наиболее универсален [12]. Твердость по Роквеллу (HR) пропорциональна глубине вдавливания индентора h [11]. Выбор шкалы измерения (A, B, C) в зависимости от типа индентора и величины нагрузки (таблица 2). Таким образом, выбор шкалы HRB для измерения твердости детали оптимален. В России для измерения твердости методом Роквелла, как правило, применяют ГОСТ 9013. Этот стандарт был применен в настоящей работе.

Таблица 2 – Шкалы определения твердости по Роквеллу [12]

Шкала	Нагрузка, Н	Индентор	Измеряемые материалы
HRA	600	Конус	Высокотвердые материалы, тонкие листы и слои (0,5-1,0 мм)
HRB	1000	Сфера	Мягкие металлы (<450 HB)
HRC	1500	Конус	Твердые металлы (>450 HB)

Анализ технологического процесса выявил, что в его рамках предусмотрен рекристаллизационный отжиг, целью которого является восстановление пластических свойств материала, сниженных в результате предыдущих операций холодной деформации, особенно при чистовой вырубке. Для оценки изменения микроструктуры листовых малоуглеродистых сталей в РФ используют ГОСТ 5640, который применительно для наших задач позволяет оценивать балльность структурно-свободного цементита. Цементит играет ключевую роль в формировании механических свойств материала. С одной стороны, его присутствие может увеличивать твердость стали, что является положительным аспектом. Однако, с другой стороны, это также приводит к снижению пластичности, что критично для процессов холодной штамповки, где требуется высокая степень деформации.

Следует отметить, что высокая концентрация цементита может привести к хрупкости материала. Это, в свою очередь, увеличивает риск трещинообразования и разрушения во время обработки. Поэтому оценка балла цементита становится важной задачей, так как она позволяет предсказать, как сталь будет вести себя при деформации.

Кроме того, структурно-свободный цементит может выступать в качестве места концентрации напряжений, что повышает вероятность возникновения трещин. Оценка его содержания дает возможность предсказать поведение материала под нагрузкой и принять необходимые меры для снижения риска трещинообразования.

Таким образом, понимание влияния цементита на механические свойства стали является ключевым аспектом, который необходимо учитывать для обеспечения надежности и долговечности деталей, производимых в процессе холодной штамповки.

Другим ключевым параметром необходимым для контроля является балл действительного зерна феррита, так как этот параметр влияет на механические свойства материала и, соответственно, на качество готовых изделий. Размер зерна феррита напрямую связан с пластичностью стали: чем

меньше зерно, тем лучше формуемость, что крайне важно в процессе холодной штамповки, где сталь подвергается значительным деформациям. Мелкое зерно также способствует повышению прочности и снижению хрупкости, что уменьшает риск трещинообразования во время обработки. Размер действительного зерна феррита будем контролировать по ГОСТ 5639.

Кроме того, знание размера зерна позволяет оптимизировать термическую обработку, такую как отжиг и закалка, что может значительно улучшить свойства стали. Регулярный мониторинг этого параметра является важной частью контроля качества, что обеспечивает стабильность характеристик материала и его соответствие требованиям для холодной штамповки. Вдобавок, понимание влияния размера зерна на механические свойства помогает в разработке новых сплавов, которые могут лучше соответствовать современным требованиям технологий. Таким образом, контроль балла действительного зерна феррита является ключевым аспектом для обеспечения надежности и качества конечной продукции. Поскольку на образование разрывов могут влиять недеформируемые неметаллические включения, их оценку будем проводить по ГОСТ 1778.

Изучение микроструктуры проводится после изготовления зеркальной поверхности микрошлифа без травления для оценки неметаллических включений и после травления в нитале (2-5% спиртовой раствор азотной кислоты) для оценки действительного зерна и структурно-свободного цементита. Травление позволяет визуализировать зеренную структуру и выделить различные фазы, что необходимо для анализа механических свойств материала. Для достижения наилучших результатов важно правильно выбрать состав травящего раствора, который должен быть достаточно активным, чтобы эффективно реагировать с поверхностным слоем стали, но не слишком агрессивным, чтобы не повредить микроструктуру. Продолжительность травления углеродистой стали в реактиве «Ниталь» для чёткого выявления микроструктуры составляет от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от природы и состояния металла, а также концентрации реактива

[10]. Точное время может варьироваться в зависимости от температуры раствора и желаемой глубины травления. Важно внимательно следить за процессом, чтобы избежать избыточного травления, которое может исказить результаты анализа. Рекомендуется проводить предварительные испытания для определения оптимального времени травления для конкретного образца.

Температура и время травления также являются критическими параметрами, так как они влияют на глубину и однородность травления. Необходимо тщательно контролировать эти условия, чтобы избежать избыточного травления, которое может привести к искажению результатов. После травления образцы следует тщательно промыть и нейтрализовать, чтобы остановить реакцию и предотвратить дальнейшие изменения в микроструктуре. Таким образом, соблюдение правильной методики травления позволяет получить четкие и информативные изображения, которые помогут в анализе и оценке качества углеродистых конструкционных сталей.[19]-[21]

Другими важными параметрами являются толщина изделия, т.к. недостаток металла может приводить к разрывам при формовке, протяженность трещин, как характеристика механизма разрушения. Линейные измерения проводят в соответствии с ГОСТ 8.050 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений». Правила выполнения измерений изложены в ГОСТ 26433.1. Оценивание погрешностей и неопределенности проводили по Р 50.2.038 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений».

2.3 Обоснование выбора оборудования

Для визуального осмотра и изучения состояния поверхности деталей нами выбран стереометрический тринокуляр компании SIAMS. Стереомикроскоп SIAMS ST-30CT (рисунок 2) комплектуется персональным

компьютером (ПК), устройством цифрового вывода сигнала и специализированным программным обеспечением (ПО) SIAMS. Стереомикроскоп исследовательского уровня с бесконечной параллельной оптической системой Галилея обеспечивает четкие микроскопические изображения деталей. Стереомикроскоп имеет диапазон увеличения от 6,7х до 45х с функцией клик-стоп для основных увеличений [18]. Стереомикроскоп комплектуется видеокамерой и программным обеспечением SIAMS для анализа дефектов поверхности материалов, загрязненности фильтров, пористости материалов, поверхности изломов и др.



Рисунок 2 – Внешний вид стереомикроскопа SIAMS ST-30CT без ПК

Анализаторы изображений SIAMS являются поверяемым средством измерения утвержденного типа и включены в госреестр средств измерений. Имеют сертификат Ростехрегулирования и утвержденную методику поверки. Управляющая программа Анализатора SIAMS включена в Единый реестр

русских программ для электронных вычислительных машин и баз данных [18]. Основные технические характеристики прибора приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики стереомикроскопа SIAMS ST-30CT

Конструктивный элемент	Характеристики
Оптическая система	Грену
Диапазон увеличений, крат	6,7х - 45х
Коэффициент масштабирования	1:6,7
Зумм-объектив	Увеличение 0.67×-4.5×. Рабочее расстояние 105 мм
Штатив	240 мм
Головка	Тринокулярный тубус с межзрачковым расстоянием 54-75 мм
Объектив	Plan Apochromatic Objective 1×, W.D. 80 мм
Осветитель	LED осветитель 5Вт с температурой света 5000-5500K
Окуляры	WF10×/22 мм Диоптрийная регулировка Угол наклона окулярных трубок 45°
Аксессуары	Кольцевой осветитель. 64 LED лампы, температура света 6500K-7000K Гибкие световоды 2 шт. LED лампы 5V 3Вт Механический предметный столик размером: 180×155×26 мм, X-75 мм, Y-55 мм Адаптер для видеокамеры C-mount

В настоящее время с целью повышения качества классификации дефектов приборы компании SIAMS оснащаются обучаемой системой искусственного интеллекта для распознавания и классификации объектов на изображениях микроскопии – SIAMS AIM. Данное решение базируется на основе обучаемых нейросетей. Современные подходы в обучении специализированного ПО для распознавания дефектов активно обсуждается в научной литературе в последние время [4,21]. Нейронная сеть обнаруживает

и выделяет объекты на изображениях, полученных при съемке с оптического микроскопа.

В SIAMS AIM поддерживается решение следующих задач: семантическая сегментация, поиск объекта и сегментация экземпляра. Для обучения модели в систему загружают изображения отдельных полей зрения, галерей изображений, а также панорамные изображения. Разметка изображений обучающей выборки производится с помощью широкого спектра инструментов, включая магическую кисть и нейрокисть. После просмотра результатов работы обученной модели возможно её дообучение. Полученные модели могут использоваться для количественного анализа изображений [18].

Для исследования микроструктуры образцов использовали прямой оптический микроскоп отраженного света SIAMS AT-24TRF (рисунок 3). Исследовательский прямой микроскоп предназначен для изучения структуры материалов в светлом поле и темном поле в проходящем и отраженном свете [13]. Бесконечная оптическая система обеспечивает изображения высокой четкости без хроматических аберраций, которые хорошо отображают детали микроструктуры образца.

Благодаря высокопрозрачному стеклу и передовой технологии покрытия объективы NIS45 формируют изображения с естественным цветом образцов. Освещение микроскопа автоматически выключается через 15 минут после ухода оператора. Это не только экономит энергию, но и продлевает срок службы лампы. Чтобы сделать систему подходящей для рабочих привычек оператора ручку фокусировки и столика можно отрегулировать влево или вправо. Такая конструкция делает работу более комфортной [13].



Рисунок 3— Микроскоп отраженного света SIAMS AT-24TRF

Микроскоп, который использовался при проведении работы был оснащен ПО SIAMS 800, которое позволяет проводить автоматическую фокусировку, фотографирование и обработку изображений. Анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел. Соответствует ТУ 4317-001-12285114-2004. Включен в Государственный реестр средств измерений, регистрационный номер №27438-10. Анализатор структур многомасштабный SIAMS. Соответствует ТУ 26.51.66-001-12285114-2021. Включен в Государственный реестр средств измерений, регистрационный номер № 85829-22. В ПО входят все необходимые нам методики в виде копий эталонов ГОСТ, указанные в предыдущем подразделе [16].

Программное обеспечение SIAMS предназначено для съемки, анализа, хранения и классификации изображений макро- и микроструктуры. Состоит из модулей для калибровки системы ввода и измерений; управления

функциями сканирования для расширения поля зрения и компенсации оптических искажений; автоматических измерений и построения отчетов [16].

Основные характеристики микроскопа SIAMS AT-24TRF представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные характеристики микроскопа SIAMS AT-24TRF

Конструктивный элемент	Характеристика
Метод исследования	Светлое поле Темное поле
Максимальная высота образца	76 мм
Диапазон увеличений, крат	50х – 1000х
Револьвер	Шестипозиционный (со слотом для DIC) Кодированный или моторизованный
Головка	Тринокулярная Угол наклона 0-35° Регулировка межзрачкового расстояния 47 – 78 мм Переключение на камеру 100:0/20:80/0:100
Объективы	Скорректированные на бесконечность объективы F.N.=25мм: NIS45 Infinite LWD PlanSemi-APO Objective (BF & DF) 5×/NA=0.15, WD=20 мм 10×/NA=0.3, WD=11 мм 20×/NA=0.45, WD=3.0 мм NIS45 Infinite LWD Plan APO Objective (BF & DF) 50×/NA=0.8, WD=1.0 мм 100×/NA=0.9, WD=1.0 мм
Окуляры	SW10×/25 мм Диоптрийная регулировка
Осветитель	Контроль интенсивности света кодированный, управление с ПК. Галогеновый осветитель мощностью 100 Вт отраженного света, с цифровым контроллером управления для автоматической настройки интенсивности света при смене увеличений Галогеновая лампа 24В 100Вт
Стол	Моторизованный Размер 210 мм x 170 мм
Фокусировка	Моторизованный привод фокусировки Коаксиальная грубая и точная регулировка, шаг перемещения 1 мкм, диапазон перемещения 35 мм

Продолжение таблицы 4

Фильтры светового баланса	ND6, ND25
Комплект моторизации	Моторизованный привод столика для перемещения по X-Y Моторизованный привод фокусировки Моторизованный привод револьвера объективов Джойстик Контроллер
Дополнительные аксессуары	Адаптер для видеокамеры C-mount

Для измерения твердости использовали твердомер KB250 компании KB PRÜFTECHNIK (Германия), фото которого представлено на рисунке 4. Преимуществами данных твердомеров является их универсальность, надежность, возможность автоматизации процесса испытаний и формирование цифрового результата, что позволяет интегрировать в лабораторную информационную менеджмент систему (ЛИМС) лаборатории. Универсальный твердомер KB250 с диапазоном нагрузок от 0,5 до 250 Н по шкалам Виккерса, МикроВиккерса, Бринелля, Роквелла, Супер-Роквелла, методу вдавливания шарика для пластиков, а также при измерениях твердости по невосстановленному отпечатку инденторами по Виккерсу и Бринеллю. Здесь реализована передовая технология «ZOOM SHOT» в 10 шагов позволяет работать без смены объективов, используя один универсальный объектив с изменяемым увеличением. Автоматическая турель на 2 или 6 позиций. Измерения отображаются на сенсорном дисплее 20 дюймов. Дополнительный дисплей размером 10,4 дюйма. Подставка под длинномерные образцы с фиксатором. Размер рабочей плоскости 600x300 мм. Высота подставки меняется при помощи шпинделя.

Новое поколение твердомеров компании KB PrüftechnikGmbH обеспечивает сверхвысокую точность и воспроизводимость. Благодаря программному обеспечению KB Hardwin XL пользователь получает расширенные возможности в процессе измерения твердости. Поддерживаются следующие методы измерения: по Бринеллю, по Виккерсу, по Роквеллу и по Кнупу в соответствии с ГОСТ 9012, ГОСТ 2999, ГОСТ 9013, ГОСТ 22975.

Инновационные разработки открывают безграничные возможности в плане автоматизации, которые делают твердомеры КВ полностью автоматическими и одновременно универсальными. Различные конфигурации, которые можно создать путем объединения многочисленных дополнительных опций, позволяют оптимизировать твердомеры КВ под индивидуальные потребности любого оператора.

Заложенные в программе функции статистической обработки предоставляют отчет в различных вариантах, от простых таблиц, графиков, гистограмм до пользовательской интеграции в системы контроля качества.



Рисунок 4 – Твердомер КВ 250

Несомненным преимуществом данных твердомеров является интегрированное ПО, которое не только управляет процессом испытаний, но и позволяет проводить обработку данных, формируя отчеты. Одним из таких удобных продуктов является 3D картирование твердости поверхности исследованных объектов (рисунок 5).

Также использования моторизованного автоматически программируемого моторизованного столика и механизма нагружения позволяют полностью автоматизировать процесс испытаний, исключая риск несоблюдения требований стандартов оператором в случае недостаточной квалификации или спешки.

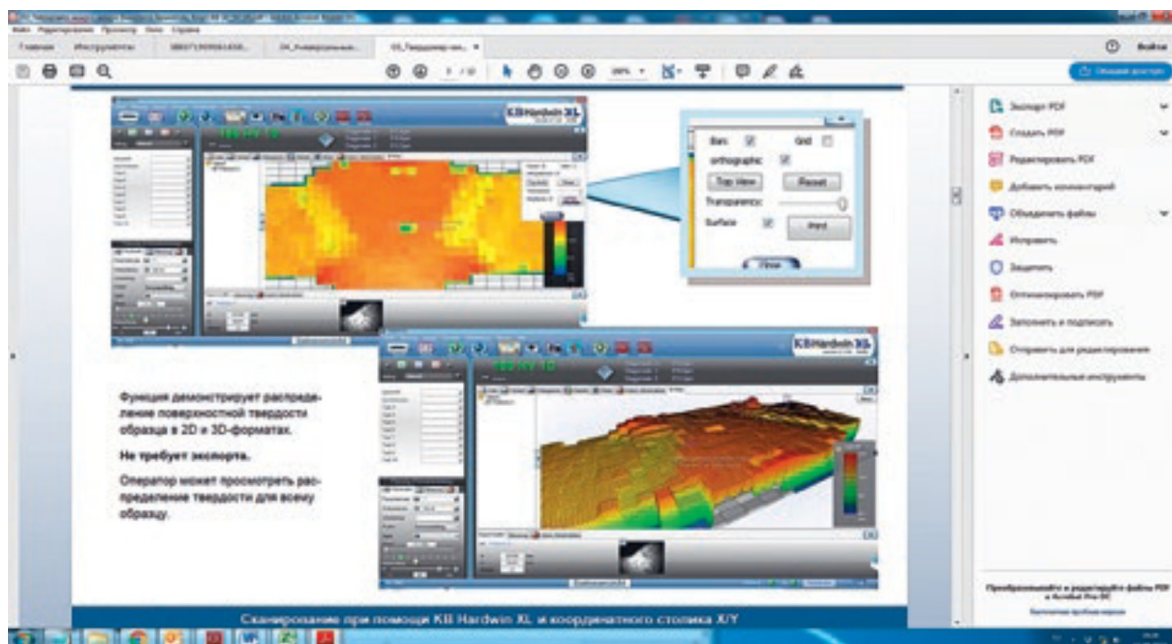


Рисунок 5 – Вид ПО твердомера KB с функцией 3D картирования твердости поверхности

В результате проведенной в данной главе работы на основании сформулированных задач были подобраны необходимые методики испытаний и исследований и подобрано соответствующее испытательное оборудование.

Стереометрический микроскоп SIAMS ST-30CT, микроскоп отраженного света SIAMS AT-24TRF и твердомер KB250 имеют современное программное обеспечение с элементами искусственного интеллекта и позволяют максимально автоматизировать процессы испытаний и исследований, свести к минимуму вероятность ошибок.

3 Результаты исследований

На исследование причин образования дефектов были предоставлены детали в различных производителей с различных этапов технологического процесса в различном состоянии: заготовки после гибки, механической обработки (сверление и растачивание отверстия), после фосфатирования и контрольных операций.

3.1 Результаты макроскопического и химического анализа заготовок и деталей «вилка»

Типовой внешний вид дефектов представлен на рисунках 6 – 9. Из визуального осмотра следует, что местом зарождения трещин является торцевая поверхность детали подверженная изгибу при формовке. Часть деталей имела некачественный для чистовой вырубке рез (рисунки 10, 12б).



Рисунок 6 – Деталь с расслоением

Большая часть разрушений начиналась с более растянутой стороны детали (рисунки 6 - 11), однако имели место случаи образования дефектов в

области, испытывающей сжатие (рисунок 12). На поверхности некоторых деталей выявлены морщины, в отдельных случаях переходящие в разрывы металла (рисунок 13).



Рисунок 7 – Трещины по месту перегиба (деталь после испытаний)



Рисунок 8 – Расслоение на участке детали с перегибом металла на 180°

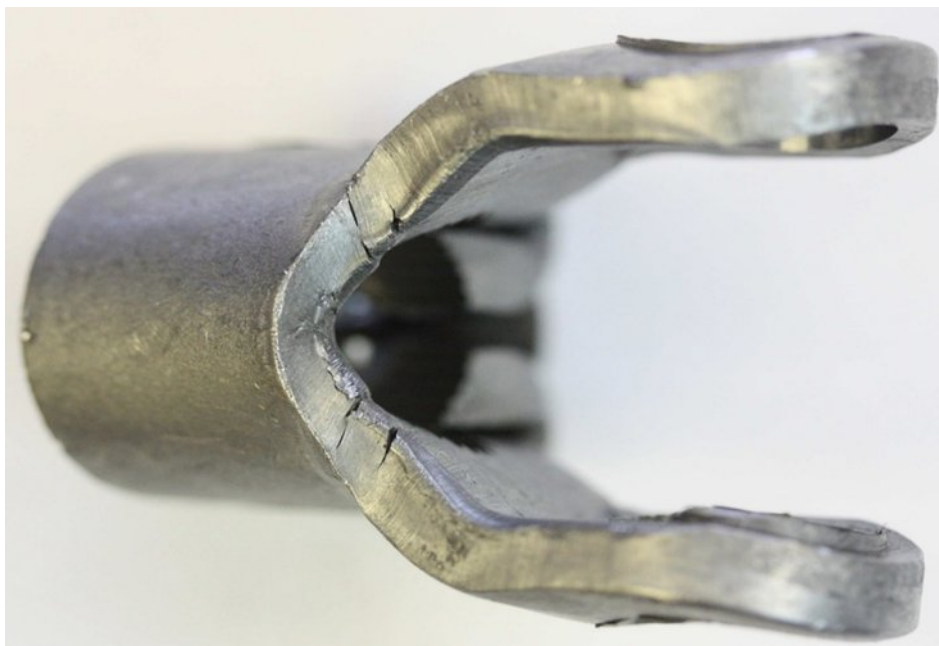


Рисунок 9 – Формованная заготовка с типовыми трещинами на переходной части детали



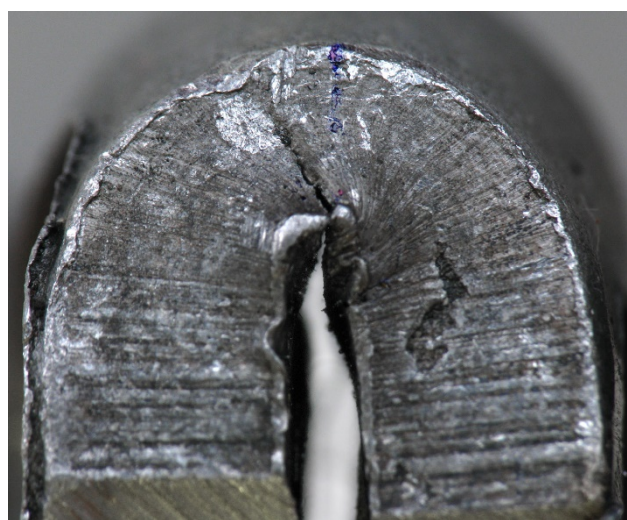
Рисунок 10 – Наволакивание металла по линии вырубki



Рисунок 11 – Растрескивание в области перегиба



а) несимметричность детали
вырубки



б) трещина на правом «ухе», дефекты
вырубки

Рисунок 12 – Трещины с очагом в области деформаций сжатия

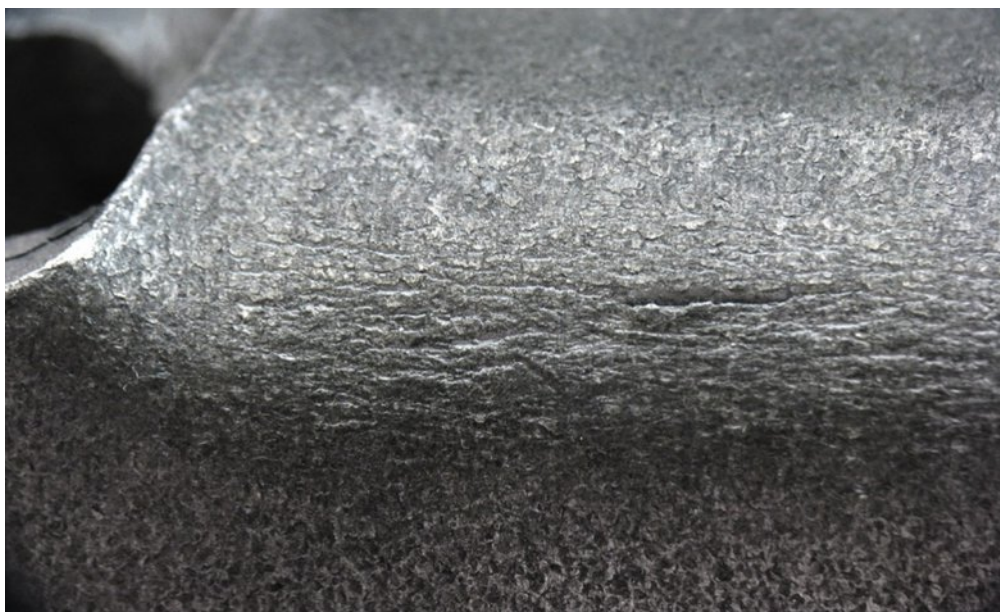


Рисунок 13 – Морщины переходящие в трещину

Таким образом, можно предположить, что причиной разрушения вилок является образование трещин напряжения, вызванных недостатком пластичности материала.

Для выявления корневых причин провели комплексный анализ, заключающийся в определении химического состава и марки стали, твердости, т.к. это требует чертеж детали и технические условия на поставку листового металлопроката, а та же исследования микроструктуры деталей..

Пример типичного химического состава приведен в таблице 5. Однако около 20% разрушенных заготовок имела отличный химический состав (таблица 6).

Таблица 5 - Результаты химического анализа образца из сталей 08Ю и 08пс

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Марка
ГОСТ 9045	Н.б. 0,09	Н.б. 0,04	Н.б. 0,45	Н.б. 0,025	Н.б. 0,03	Н.б. 0,10	Н.б. 0,10	Н.б. 0,10	0,02 - 0,07 -	08Ю, 08пс
образец	0,05	0,02	0,13	0,020	0,023	0,02	0,02	0,01	0,03	08Ю, 08пс

Химический состав представленного образца соответствует марки стали 08Ю, 08пс по ГОСТ 9045. Содержание элементов представлено в массовых процентах.

Таблица 6 - Результаты химического анализа образцов деталей «вилка»

Требования	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al
08Ю	$\leq$ 0.07	$\leq$ 0.03	$\leq$ 0.35	Не оговаривается		0.03- -0.07
Норма для 20	0.17- -0.24	0.17- -0.37	0.35- -0.65	$\leq$ 0.25	$\leq$ 0.30	-
Фактически: 20 *	0.24	0.24	0.50	0.04	0.02	-

Было обнаружено, что для изготовления исследуемых деталей используется сталь 20, что не соответствует техническим условиям. Согласно литературным данным, сталь 20 после специальной подготовки также может успешно применяться для получения деталей методом чистовой вырубki, однако очевидно это требует коррекции технологических процессов. Поэтому до корректировки технологического процесса сталь 20 необходимо исключить из материалов, предназначенных для изготовления деталей «вилка».

Определяющим был анализ микроструктуры. Результаты исследования которой представлены в следующем разделе.

3.2 Результаты металлографического анализа и испытаний на твердость.

Пробу для микроструктуры отбирали таким образом, чтобы в рез попала торцевая поверхность (линия вырубки профиля из листового проката).

Результаты металлографического анализа и измерения твердости типовых случаев представлены в таблицах 7 – 9 и на микроскопических фотографиях (рисунки 14-20)

Таблица 7 – Металлографические исследования деталей с дефектами

Характеристика	Требования	Фактические результаты
Качество поверхности	Поверхность ленты должна быть без трещин, плен, расслоений	Дефекты отсутствуют
Дефекты чистовой вырубки и формовки, мм	-	Надрывы переходящие в трещины. Надрывы заполнены фосфатами
Микроструктура	Феррит + цементит	Феррит, цементит
Балл зерна феррита, G	От 5 до 9 номеров по шк. 1 ГОСТ 5639	7,6,5 в зоне вырубки зерно феррита деформировано
Структурно-свободный цементит, балл	Структурно-свободный цементит д.б. не более 2 балла ряда А,Б,В шк.1 ГОСТ 5940	0-1 балл, ряд А, шк. 1 (рис. 9)
Твердость, HRB	Исх. металл не более 67 деталь п.1 ³ 52	68...71

В исследованных заготовках выявлены отклонения от требований нормативной документации как по твердости, так и по микроструктуре. По твердости выявлены случаи пониженной до 46 HRB твердости, так и повышенной до 84 HRB. По микроструктуре выявлены отклонения по размеру зерна феррита и по наличию перлита (рисунок 16). Наличие перлита указывает, что был использован металлопрокат в горячекатаном состоянии, в то время как для чистовой вырубки применяется отожженная на зернистый перлит сталь. Пример микроструктуры с отклонением по размеру зерна представлен на рисунке 15.

Таблица 8 – Результаты исследований деталей без фосфатирования

Характеристика		Технические требования	Фактические результаты	
			№ 1	№ 2
Твердость, HRB		В состоянии поставки: не более 67 В детали: ³ 52	82	67
Микроструктура		Феррит, цементит	Феррит, сорбитообраз- ный перлит, цементит	Феррит, цементит
Балл зерна феррита, G		Величина зерна феррита д.б. в пределах от 6 до 10 номеров по шк. 1 ГОСТ 5639	6,7	6,7
Структурно-свободный цементит, балл		Структурно-свободный цементит ... не крупнее 2 балла ряда А,Б,В шк.1 ГОСТ 5640	1,2 балл ряд А,Б,В шк.1	2 балл ряд А шк.1, 1,2 балл ряд Б,В шк.1
Дефекты, мм	Исходного металла	-	Отсутствуют	
	Формовки	-	Надрывы глубиной до 1,4 мм	Отсутствуют

Таблица 9– Анализ деталей с трещинами после формовки

Характеристика		Технические требования	Фактические результаты
Качество поверхности		Поверхность ленты должна быть без трещин, плен, расслоений	Дефекты отсутствуют
Дефекты вырубки и формовки, мм			Надрывы, переходящие в трещины
Микроструктура		Феррит + цементит	Феррит + структурно-свободный цементит, перлит в цементитной оболочке (рис. 11) структура деформирована
Балл зерна феррита, G		5 до 9 номеров по шк. 1 ГОСТ 5639 на вытянутом зерне не определяется	Зерно вытянутое 6,5,4 балла, в зоне вырубки на глубину 0,52 мм зерно феррита деформировано
Цементит, балл		структурно-свободный цементит д.б. не более 2 балла ряда А,Б,В шк.1	0...2 балл, ряд А, шк. 1
Твердость, HRB		исх. металл: не более 67, КД (деталь): ³ 52	50...51,5

Однако на наш взгляд основной проблемой является, выявленная при металлографическом анализе пластическая деформация действительного

зерна феррита на глубину до 0,5 мм, образовавшаяся при чистовой вырубке заготовки из листового металлопроката (рисунки 17 – 20).

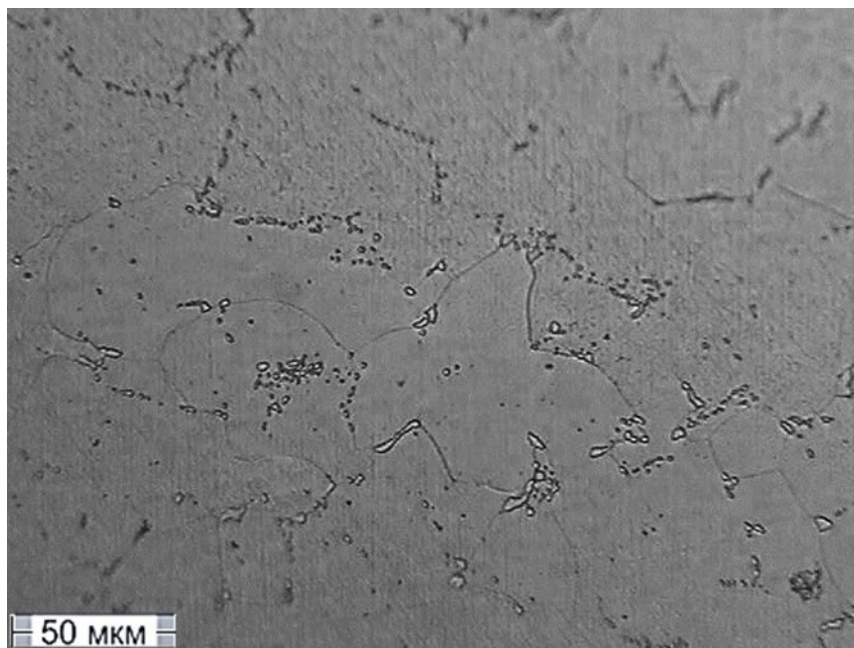
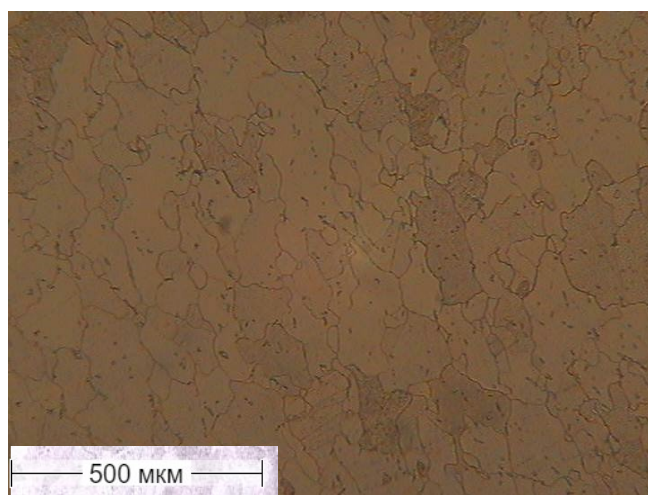
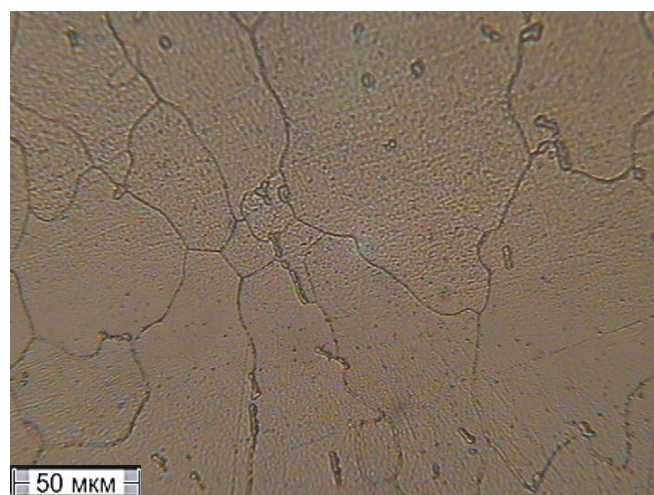


Рисунок 14 – Микроструктура образца со структурно-свободным цементитом 0...1 балл, x400



а) x 100

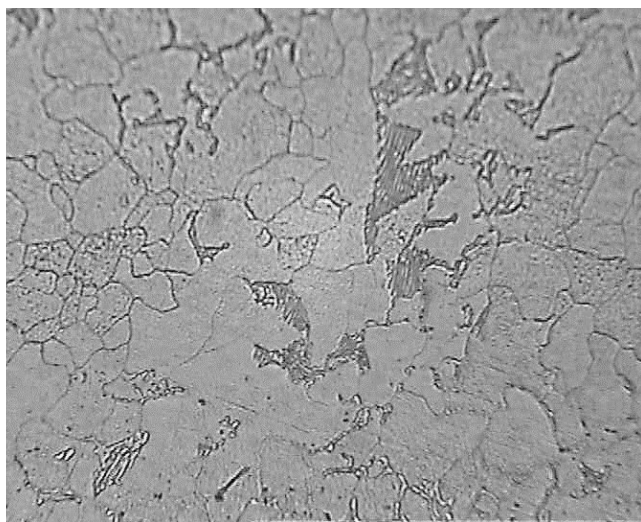


б) x 400

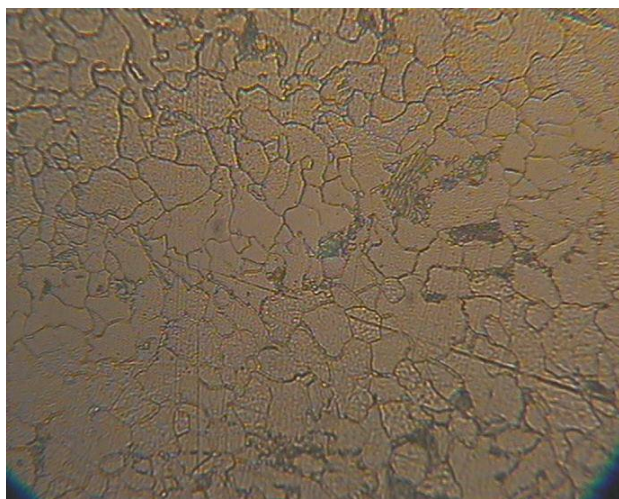
Рисунок 15 – Микроструктура образца: феррит + структурно-свободны цементит 0 балла. Действительное зерно 6,5,4 баллы

В деталях с трещинами, выявлено, что при чистовой вырубке образуется не только наклепанная зона с вытянутым зерном феррита, но и микроразрывы,

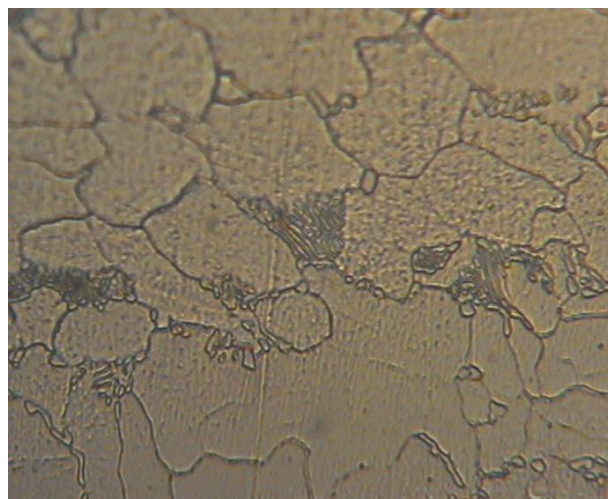
заусенцы. В условиях, когда запас пластических свойств полностью исчерпан, последующая макропластическая деформация при формовки провоцирует возникновение трещин напряжения. Риск образования трещин увеличивается, т.к. пластины цементита при деформации образуют цепочки, увеличивая тем самым анизотропию свойств (рисунки 18 – 19). Образование заусенца показано на рисунке 20.



а) x100



б) x100



в) x400

Рисунок 16 – Феррит + цементит + перлит в цементитной оболочке



х 100

Рисунок 17 – Зерно феррита по линии реза деформировано на глубину 0,52 мм

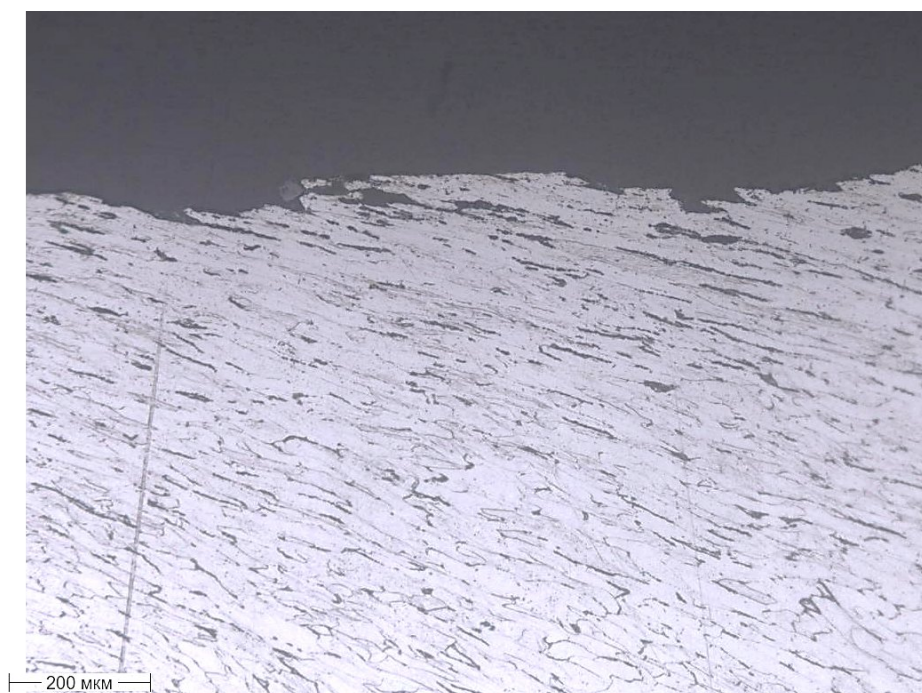


Рисунок 18 – Образование надрывов по наклепанной зоне, х200

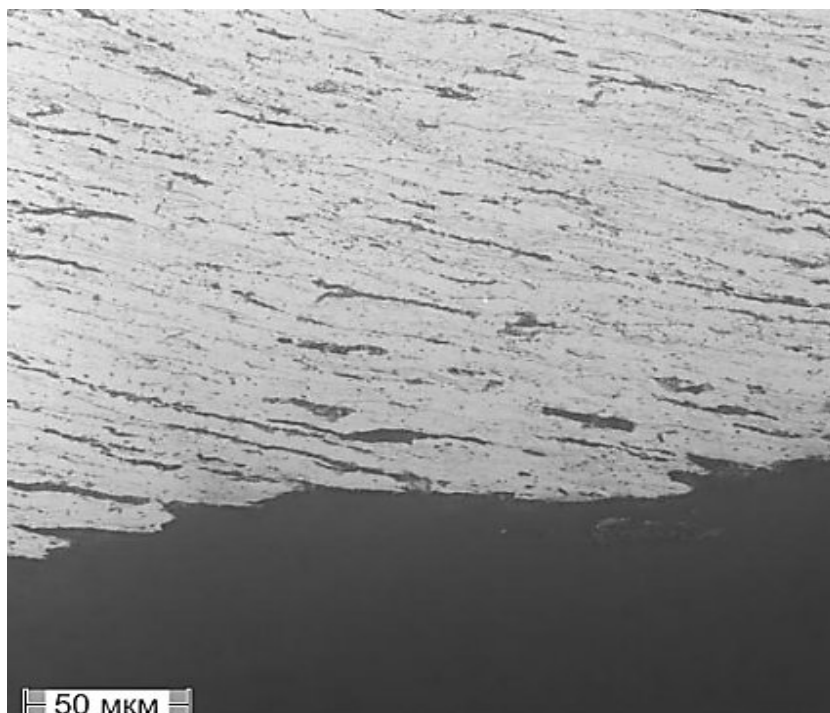


Рисунок 19 – Образование надрывов по наклепанной зоне, х500

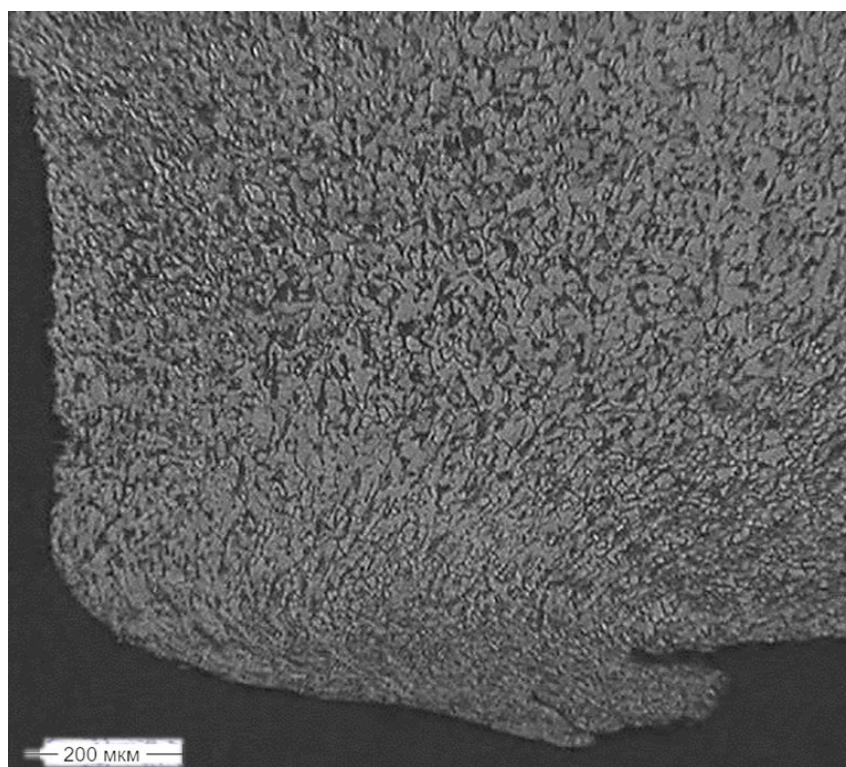


Рисунок 20 – Образование заусенца, х200

Снизить риски образования в этом случае призвана операция рекристаллизационного отжига, который, как правило, проводят при температуре 620...680°C. В результате вместо пластически деформированного зерна образуется мелкозернистая микроструктура с высоким уровнем пластичности (рисунок 21).

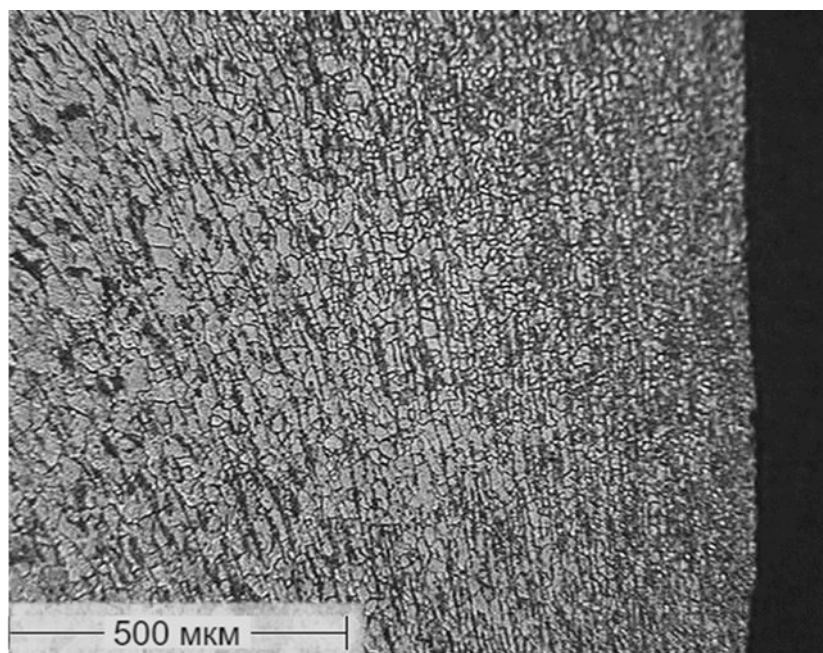


Рисунок 21 – Рекристаллизованное зерно, x100

Детали, прошедшие эту операцию не склонны к образованию трещин. Однако существует риск, что в результате отжига прочностные характеристики могут оказаться ниже заложенных конструктором. Поэтому проверили влияние термической обработки на рекристаллизацию наклепанной зоны и твердость заготовок. Для чего провели отжиг при 680°C в течение 1 часа с охлаждением на воздухе, отжиг при 680°C в течение 1 часа при охлаждении с печью до 300°C и отжиг при 620°C с охлаждением на воздухе. Результаты исследований микроструктуры стали после рекристаллизационного отжига представлены в таблице 10 и на рисунке 22.

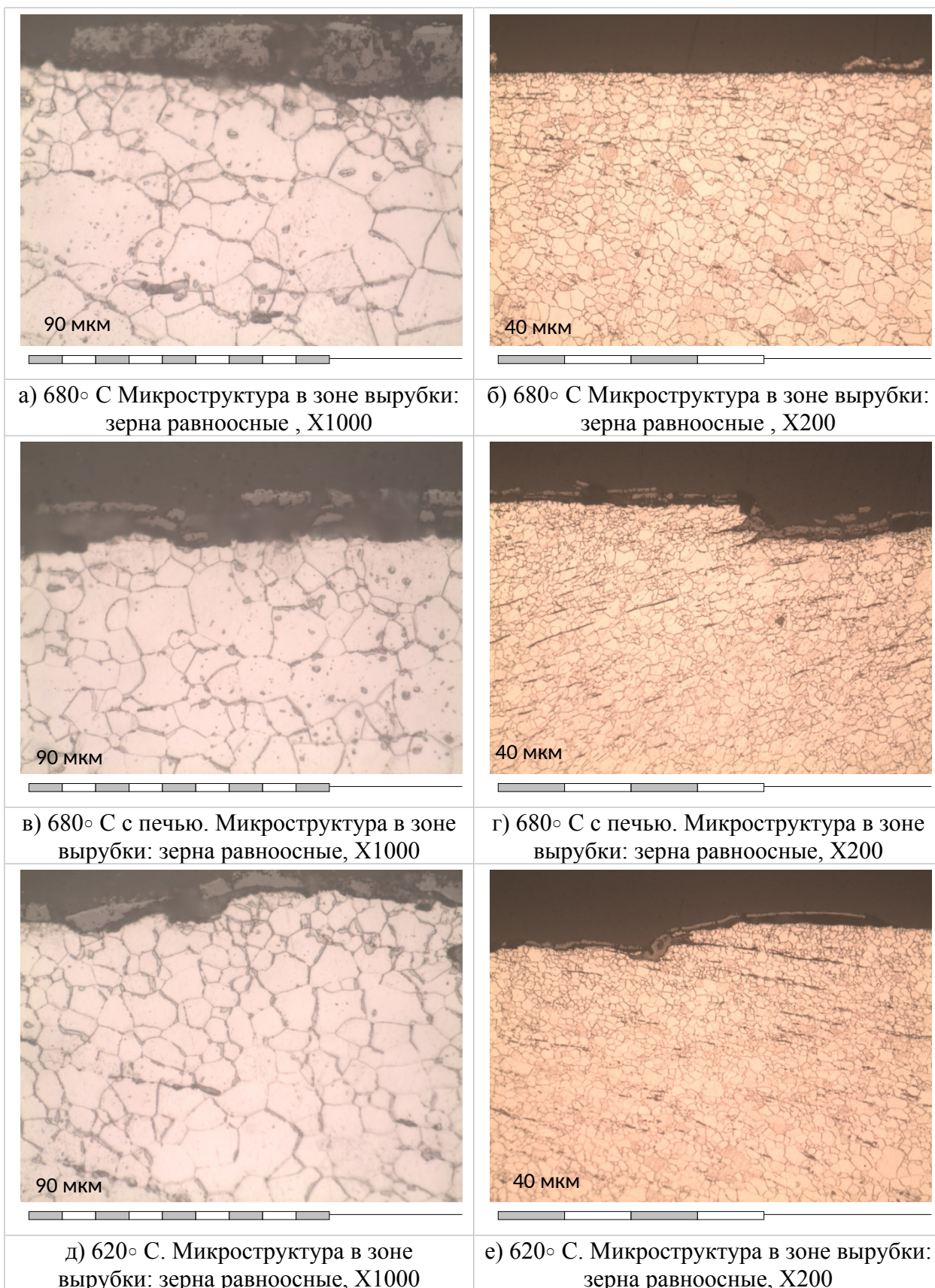


Рисунок 22 - Микроструктура поверхностного слоя деталей «вилка» после различных режимов отжига

Таким образом, твердость детали после рекристаллизационного отжига соответствует требованиям чертежа только при температуре 620° С. При отжиге 680° С несмотря на то, что наклеп устраняется, твердость занижена до 46 HRB, а согласно техническим требованиям твердость должна быть более 52HRB.

Таблица 10 – Влияние режимов отжига на твердость деталей

Характеристика	Технические требования	Фактические результаты		
		680° С	680° С, охлаждение с печью до 300° С	620° С
Твердость, HRB	≥ 52	49...52	48-49	62-64

В результате проведенной работы установлено, что отсутствие рекристаллизационного отжига после вырубки является ключевым фактором, определяющим склонность деталей к растрескиванию при формовке. Однако отклонения в режимах термической обработки могут привести к снижению прочности (твердости) ниже установленной конструктором.

Заключение

Анализ и синтез экспериментальных данных позволили сформулировать нижеприведенные выводы.

По микроструктуре выявлены отклонения по размеру зерна феррита и по наличию перлита в структуре сталей. Наличие перлита указывает, что был использован металлопрокат в горячекатаном состоянии.

Основной причиной образования трещин в деталях «вилка» является недостаток запаса пластичности после чистовой вырубki заготовки из листового металлопроката, о чем свидетельствует пластическая деформация действительного зерна феррита на глубину до 0,5 мм и завышенная твердость деталей.

Отсутствие рекристаллизационного отжига после вырубki является ключевым фактором, определяющим склонность деталей к растрескиванию при формовке.

Для устранения причин образования трещин на конструктивных элементах «вилка» рулевого механизма рекомендуется:

- организовать входной контроль металлопроката по твердости и микроструктуре;
- после чистовой вырубki назначить обязательной технологической операцией рекристаллизационный отжиг заготовок по режиму отжиг при температуре 620°C один час с охлаждением на воздухе, для устранения наклепа поверхностного слоя изделий и обеспечения требуемой пластичности.
- ввести дополнительный контроль качества заготовок, а именно магнито - порошковый метод неразрушающего контроля.

Настоящие исследования в очередной раз подтверждают необходимость строго соблюдения технологии изготовления деталей конструкций для обеспечения надлежащего качества изделий, их надежности и долговечности в эксплуатации.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анисович А. Г. О качестве стального полуфабриката // Литье и металлургия, 2019, №1. С. 102-107.
2. Анисович А. Г., Красневский С. М., Степанкова М. К. Использование темнопольного изображения для идентификации фазовых составляющих трубных сталей // Литье и металлургия. 2012. № 1(64). С. 99–103.
3. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие/ В.Г. Бурдуковский – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 223с.
4. Васильев П.В., Сеничев А.В. Применение нейросетевых технологий в задаче контроля поверхностных дефектов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2020. №1 (205). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyrosetevyh-tehnologiy-v-zadache-kontrolya-poverhnostnyh-defektov> (дата обращения: 26.12.2024).
5. Гвоздев А. Е., Журавлёв Г. М., Кузовлева О. В. Основы формирования состояния высокой деформационной способности металлических систем // Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 382 с.
6. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический способ оценки микроструктуры листов и ленты/ Государственный комитет СССР по стандартам; Москва: Издательство стандартов, 1988. 17с.
7. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна/ Межгосударственный стандарт; Москва: ИПК Издательство стандартов, 1982. 20с.
8. Громов В.Е., Аксёнова К.В., Иванов Ю.Ф., Кузнецов Р.В., Кормышев В.Е. Трансформация тонкой структуры пластинчатого перлита при деформации рельсовой стали. Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия, 2023. №66(1). С.50-56.

9. Давыдов С.В., Болдырев Д.А., Попова Л.И., Тюрков М.Н. Материаловедение: учебное пособие / С.В. Давыдов и др.; Москва; Вологда: Инфа-Инженерия, 2020. 424с.
10. Ильинкова Т.А., Куртаева Ф.Н. Металлографический анализ/ Учебное пособие, Казанский национальный исследовательский технический университет; Казань, 2017. 120 с.
11. Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б. Методы измерения твердости. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. 150 с.
12. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е. И. Орешко, Д. А. Уткин, В. С. Ерасов, А. А. Ляхов // Труды ВИАМ. – 2020. № 1(85). С. 101-117. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117. – EDN QOYFKC.
13. Прямой моторизованный микроскоп SIAMS AT-24TRF // SIAMS / https://siams.com/opticheskiemikroskopy/pryamyemikroskopy/microscope_at-24TRF/ (дата обращения: 26.12.2024).
14. Рудман Л.И. Справочник по оборудованию для листовой штамповки / Л.И. Рудман, А.И. Зайчук, В.Л. Марченко.- Москва : Техника, 2001. 232с.
15. Сардаев Н.И. Особенности изготовления деталей методом чистовой вырубки [Текст] / Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ). Идентификация и моделирование свойств материалов и технологических процессов. Труды 5-й Московской международной конференции 24 – 27 апреля 2007 г.// Н.И. Сардаев, А.В. Святкин. Москва, 2008. С. 295 – 300.
16. SIAMS 800 // SIAMS / <https://siams.com/siamss800/> (дата обращения: 26.12.2024).
17. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: Учебное пособие/М.А.Смирнов и др.; Москва: Наука и технологии, 2002. 519с.
18. Стереомикроскоп SIAMS ST-30CT // SIAMS / https://siams.com/opticheskiemikroskopy/stereomikroskopy/microscope_ST-30CT/ (дата обращения: 26.12.2024).

19. Структурно-фазовое состояние и механизмы упрочнения деформированной стали / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Попова, С.В. Коновалов, Н.А. Конева. Новокузнецк: Полиграфист, 2016. 510с.

20. Li Y.J., Choi P., Borchers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Materialia*. 2011. № 59(10): С. 3965-3977.

21. Fu G, Zhang Z, Le W, Li J, Zhu Q, Niu F, Chen H, Sun F and Shen Y (2023) A multi-scale pooling convolutional neural network for accurate steel surface defects classification. *Front. Neurorobot.* 17:1096083. doi: 10.3389/fnbot.2023.1096083