

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЩЕРБАКОВ Александр Павлович

**ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ
И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Специальность **2.5.11.** Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Пушкарев А. Е.

Санкт-Петербург – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОБЗОР МЕТОДИК РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ УЗЛОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ	13
1.1. Примеры расчетов прочности основных рабочих узлов дорожно-строительных машин при реализации различных видов напряженного состояния элементов	13
1.2. Основные способы повышения уровня механических характеристик сталей	19
1.2.1. О связи механических характеристик материалов с размером зерна.....	19
1.2.2. Термическая обработка сталей.....	21
1.2.3. Равноканальное угловое прессование.....	23
1.2.4. Кручение под высоким давлением.....	27
1.2.5. Порошковая металлургия.....	28
1.2.6. Поверхностная обработка деталей.....	31
1.3. Цели и задачи исследований, проводимых в данной диссертационной работе	33
1.4. Выводы по главе 1	34
2. ТРЕБОВАНИЯ К ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМ МАШИНАМ. МАТЕРИАЛЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	36
2.1. Основные требования к дорожно-строительным машинам.....	36
2.1.1. Классификация дорожно-строительных машин.....	36
2.1.2. Критерии работоспособности дорожно-строительных машин.....	37

2.1.3. Характер нагрузок, действующих на рабочие органы дорожно-строительных машин.....	41
2.1.4. Материалы деталей дорожно-строительных машин.....	44
2.1.5. Материалы и объекты исследований.....	46
2.2. Формирование комплекса характеристик сталей для обоснования возможности замены.....	47
2.2.1. Общие требования по качеству к материалам, деталям и дорожно-строительным машинам.....	47
2.2.2. Требования по надежности.....	47
2.2.3. Эксплуатационные требования.....	49
2.2.4. Экономические требования применительно к сталям 09Г2С и 30MnB5.....	50
2.2.5. Характеристика технологичности сталей 09Г2С и 30MnB5.....	53
2.2.6. Комплекс характеристик сталей, сформированный для обоснования возможности замены материала.....	58
2.3. Термоциклическая обработка сталей.....	61
2.3.1. Теоретические основы метода термоциклической обработки сталей.....	61
2.3.2. Сведения об имеющихся результатах термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5.....	64
2.3.3. Выбор режимов термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5, использованных при исследованиях.....	69
2.4. Выводы по главе 2.....	70
3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	72
3.1. Определение размера зерна.....	72
3.2. Определение физико-механических характеристик сталей.....	72

3.2.1. Испытания на растяжение и сжатие.....	72
3.2.2. Испытания на изгиб	74
3.2.3. Определение предела выносливости	76
3.2.4. Определение твердости и микротвердости сталей и их сварных соединений.....	77
3.2.5. Численное моделирование деформирования зуба ковша экскаватора	79
3.3. Выводы по главе 3	84
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	85
4.1. Результаты исследований и их обсуждение.....	85
4.1.1. Исследования среднего размера зерна, полученного при термоциклической обработке	85
4.1.2. Исследование физико-механических характеристик сталей при растяжении.....	87
4.1.3. Исследование физико-механических характеристик сталей при сжатии.....	96
4.1.4. Исследование механических характеристик сталей при изгибе.....	98
4.1.5. Результаты циклических испытаний	101
4.1.6. Микротвердость сварных соединений.....	103
4.1.7. Оценка износостойкости сталей.....	104
4.1.8. Оценка трещиностойкости сталей	107
4.2. Расчетная оценка работоспособности зуба ковша экскаватора ЭЖГ-5А.....	108
4.2.1. Результаты расчета тестовой задачи изгиба балки.....	108
4.2.2. Расчет максимальных напряжений в зубе ковша экскаватора.....	112

4.2.3. Расчет максимальных напряжений в зубе ковша экскаватора при наличии трещины	118
4.3. Заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5.....	120
4.3.1. Технический аспект вопроса замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5.....	120
4.3.2. Показатели надежности работоспособности деталей	123
4.3.3. Целесообразность замены сталей с экономической точки зрения	127
4.4. Выводы по главе 4	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135
ПРИЛОЖЕНИЯ	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Основные дорожно-строительные работы включают достаточно широкий спектр таких технологических операций, как разработка, перемещение и уплотнение грунта, буровые и свайные работы, ремонт инженерных коммуникаций, подготовительные виды работ, гидромеханизация земляных работ, разработка мерзлых грунтов, реконструкция и устройство дорожного покрытия и т. д. Такое многообразие выполняемых работ означает необходимость разработки большого числа различных дорожно-строительных машин (ДСМ). При этом сохраняется общность подходов в таких вопросах, как определение характера силовых и климатических воздействий на рабочие органы ДСМ и поиск путей повышения их эффективности, экономичности, надежности и производительности. Такая работа ведется на всех этапах жизненного цикла машин и включает в себя обоснование конструктивного исполнения и режимов работы как машины в целом, так и отдельных ее узлов и деталей. Последнее обстоятельство в первую очередь связано со свойствами материалов, из которых изготовлены рабочие органы машин, поскольку повышенные прочностные характеристики применяемых материалов позволяют увеличить временные интервалы межрегламентных работ, а следовательно, повысить эффективность использования ДСМ.

Знание уровня механических и физических характеристик нескольких материалов позволяют уже на этапе проектирования использовать те, которые повышают ее эксплуатационные качества. Чем больше информации о свойствах материалов будет предоставлено разработчику машин, тем более обоснованным будет выбор.

Из сказанного выше можно заключить, что повышение долговечности рабочего оборудования за счет обоснованного выбора материала деталей, формирования технологических воздействий на этапе изготовления и ремонта ДСМ представляет собой важную народнохозяйственную задачу и определяет актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами совершенствования конструкций и эксплуатации ДСМ занимались научные школы Санкт-Петербургского строительного-архитектурного университета, Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) и т. д. Решению проблем в данном направлении посвящены работы В. И. Баловнева, В. Е. Гордиенко, Н. Г. Гринчара, Ю. И. Густова, В. А. Зорина, В. Н. Кузнецовой, К. П. Манжула, И. А. Недорезова, А. К. Рейша, С. В. Репина, В. В. Савинкина, В. С. Щербакова и многих других.

Цель и задачи исследования. *Цель исследования* – установление новых и уточнение существующих закономерностей изменения свойств материалов рабочих органов ДСМ, включая сварные соединения, в зависимости от реализуемой термоциклической обработки, обеспечивающей повышение надежности эксплуатации машин.

Задачи исследования. Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Провести поиск сведений, приведенных в научно-технической литературе, по путям получения мелкозернистой структуры сталей для повышения уровня их физико-механических характеристик, удовлетворяющих требованиям условий применения ДСМ.

2. Осуществить выбор объектов исследований и оценить объем исследований свойств сталей исходя из возможностей имеющегося технологического и испытательного оборудования.

3. Провести комплексные исследования физико-механических и физических характеристик выбранных сталей и обработку полученных результатов. На основании полученных результатов построить математические модели, связывающие уровень физико-механических характеристик сталей с их структурой.

4. С использованием определенных физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5 провести расчетные исследования прочности зуба ковша

экскаватора ЭКГ-5А, включая оценку чувствительности к концентраторам напряжений.

5. Провести сравнение показателей характеристик выбранных объектов исследований и обосновать выбор наиболее предпочтительного материала для изготовления деталей ДСМ с учетом выявленных закономерностей применения технологических приемов.

Объект исследования. Работоспособность и долговечность ДСМ в связи с применяемыми при изготовлении деталей рабочих органов машин материалами и технологическими воздействиями.

Предмет исследования. Закономерности, характеризующие связь физико-механических и физических характеристик материала с его структурой, а также расчетная оценка работоспособности рабочего органа ДСМ.

Рабочая гипотеза состоит в том, что повышение долговечности при эксплуатации ДСМ обеспечивается уменьшением размера зерна материалов, из которых изготовлены детали рабочих органов, что позволяет повысить уровень физико-механических характеристик.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойства для стали 09Г2С и 30MnB5 при термоциклической обработке. Установлено, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, в то время как сталь 30MnB5 реагирует на дальнейшее проведение термоциклической обработки уменьшением среднего размера зерна вплоть до десятого цикла.

2. Экспериментально исследован комплекс физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе с размером зерна. Для стали 30MnB5 впервые получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволили оценить влияние числа циклов на такие

параметры сталей 09Г2С и 30MnB5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.

Методология и методы исследования. Методология исследований построена на экспериментальном изучении изменяемости комплекса физико-механических и физических характеристик сталей и теоретическом анализе влияния этих изменений на работоспособность ДСМ при их эксплуатации. Помимо прямых экспериментов по определению характеристик сталей, были использованы математическое моделирование, теоретические подходы обеспечения прочности, надежности и долговечности ДСМ, а также методы математической статистики.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, п. 2 – «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации» – и п. 3 «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Положения, выносимые на защиту:

1. Термоциклическая обработка сталей приводит к уменьшению размеров зерна и существенному изменению физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5.

2. Результаты расчетных и экспериментальных исследований комплекса механических и физических характеристик деталей и их сварных соединений, подтверждающие возможность повышения долговечности рабочих органов ДСМ за счет обоснованной замены материала при их изготовлении и ремонте.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением общепринятых методов и методик выполнения теоретических и экспериментальных исследований, использованием стандартизованных методик измерения и последующего анализа результатов; подтверждена сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов, их практическим использованием; обеспечена применением сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность, и согласованностью полученных результатов теоретических исследований и эксперимента.

Практическая ценность и реализация результатов исследований состоит в установленной целесообразности замены материала рабочего органа как пути повышения надежности ДСМ. Материал рабочего органа (сталь 30MnB5) рекомендован к практическому использованию для различных организаций в сфере тяжелого машиностроения, машиностроения и дорожного строительства (ООО «СПбГАСУ-Дорсервис», ООО «Марка», АО «Северо-Западный региональный центр концерна ВКО „Алмаз-Антей”» — Обуховский завод, ООО «Завод дорожных машин», АО «ГК „Северавтодор”», АО «Московский машиностроительный завод „Авангард”», ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения»), а также в учебных программах вузов (СПбГАСУ, ВГТУ, СибАДИ) в рамках подготовки обучающихся по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» по направлению 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Теоретическая значимость заключается в развитии теории формирования физико-механических свойств сталей для применения в конструкциях строительных и дорожных машин при исследовании зависимости размеров зерна сталей 09Г2С и 30MnB5 от количества термоциклов обработки.

Практическая значимость заключается в возможности применения термоциклической обработки для измельчения зерна исследуемых материалов – сталей 09Г2С и 30MnB5. Так, при осуществлении десяти циклов «нагрев – охлаждение» для стали 09Г2С происходит уменьшение размеров зерна с 32 мкм в исход-

ном состоянии до 7,5 мкм. Для стали 30MnB5 степень измельчения структуры оказывается еще более существенной – с 22 до 1,5 мкм.

Сформулированные соискателем выводы и практические рекомендации могут быть использованы при оценке различных аспектов повышения долговечности ДСМ и наземных транспортно-технологических средств и комплексов при их эксплуатации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. III International Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies in Environmental Science and Education”, ITESE 2019 (9–14 сентября 2019 года, с. Дивноморское, Краснодарский край).

2. 13th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for The Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2020 (26–28 февраля 2020 года, г. Ростов-на-Дону).

3. International Scientific and Practical Conference on Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020 (20–22 октября 2020 года, г. Ростов-на-Дону).

4. 73-я научная конференция профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (4–6 октября 2017 года, г. Санкт-Петербург);

5. 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета (3–5 октября 2018 года, г. Санкт-Петербург);

6. 71-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (04–06 апреля 2018 года, г. Санкт-Петербург);

7. XVIII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» (5 апреля 2020 года, г. Пенза);

8. Международная научно-техническая конференция молодых ученых (25–27 мая 2020 года, г. Белгород);

9. I Всероссийская межвузовская научно-практическая конференции молодых ученых, посвященная 80-летию основания кафедры «Строительное производство» (14–15 мая 2020 года, г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 34 печатных работах общим объемом 41,0 п. л. (из которых лично автором написано 25,94 п. л.). Из числа этих работ 11 публикаций приходится на рецензируемые издания из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК РФ; 10 научных статей опубликованы в изданиях, включенных в международную базу научного цитирования Scopus. Кроме того, автором изданы две монографии и один патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них и заключения. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста; она содержит 71 рисунок, 19 таблиц, список использованной литературы из 134 наименований.

Личный вклад автора заключается в постановке и решении научной задачи повышения эксплуатационных характеристик рабочих органов ДСМ за счет выбора материала и повышения его механических характеристик путем применения термоциклической обработки в качестве технологической операции для получения мелкозернистой структуры. С этой целью при непосредственном участии автора осуществлены организация и проведение экспериментальных исследований комплекса характеристик двух сталей, одна из которых (30MnB5) рассмотрена в качестве замены применяемой (09Г2С) в настоящее время. При анализе результатов исследований автором были учтены требования к прочности и надежности конструкций рабочих органов ДСМ и наземных транспортно-технологических средств и комплексов, включая сварные соединения. Коллективом авторов при непосредственном участии соискателя были выпущены две монографии, связанные с изучением коррозионных процессов и путей повышения долговечности рабочих органов, а также защищен патент на изобретение, относящийся к производству смазочно-охлаждающих жидкостей и их концентратам, используемым при механической обработке металлов.

1. ОБЗОР МЕТОДИК РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ УЗЛОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ

1.1. Примеры расчетов прочности основных рабочих узлов дорожно-строительных машин при реализации различных видов напряженного состояния элементов

Прочность элементов конструкций-дорожно-строительных машин (ДСМ), будучи одним из основных критериев ее работоспособности, трактуется как способность детали сопротивляться разрушению. Помимо этого критерия, работоспособность машин характеризуется жесткостью и износостойкостью. Для определенных типов ДСМ в качестве критериев работоспособности выступают теплоустойчивость и виброустойчивость [40].

Алгоритм решения задач по оценке прочности элементов конструкции включает в себя несколько этапов (рисунок 1.1)



Рисунок 1.1 – Алгоритм решения задач по оценке достаточности прочности

Внешние рабочие нагрузки либо задаются (обычно техническими требованиями), либо рассчитываются. Внутренние усилия и моменты в сечениях элементов уравнивают действие внешних нагрузок, т. е. находятся из условий равновесия. При этом для расчетов используется идеализированная схема конструкции. Определение напряжений осуществляется с учетом вида напряженного состояния (НС). При раздельном действии нагрузок растяжения/сжатия, изгиба, кручения или среза речь идет соответственно о напряжениях растяжения, сжатия и т. д. При одновременном действии данных нагрузок при расчете напряжений необходимо учитывать все составляющие нагрузок. При этом полное напряжение p при реализации в расчетной точке поперечного сечения одновременно нормальных σ и касательных τ напряжений определяется из соотношения [41]

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}.$$

На заключительном этапе оценки достаточности прочности элементов конструкций полученные значения напряжений сравниваются с допускаемыми значениями для соответствующего вида НС (такой подход чаще используется на этапе проектирования). Еще один вариант оценки достаточности прочности элемента конструкции – использование коэффициента запаса прочности, учитывающего требования конструкции по ее надежности. Но в любом варианте (допускаемые напряжения или коэффициент запаса) в качестве исходной характеристики физико-механических характеристик материала служат предел прочности или текучести, предел выносливости и т. д. [40]. Иногда применяются различные критерии прочности и пластичности, которые подробно рассмотрены в работе [42].

В технической литературе представлено достаточно большое количество задач по оценке прочности различных деталей и элементов рабочих органов ДСМ. При этом авторы приводят решения либо до конечного результата (соотношения для определения напряжений), либо ограничиваются определением внешних нагрузок, действующих на рабочий орган. Приведем некоторые из них.

В работах [43, 44] описана последовательность вычисления напряжений в зубе отвала бульдозера/автогрейдера. Отмечается, что существуют два понятия,

связанных процессами проведения земельных работ. Первое связано собственно с резанием грунта, т. е. с процессом внедрения режущего инструмента машины (клина) и отделением разрушенного слоя грунта от массива (стружка). Второе понятие более широкое – это копание грунта. Оно включает в себя процессы резания грунта и перемещения отделившейся части (призмы волочения) вдоль отвала бульдозера или перед ним. Соответственно, в процессе резания со стороны грунта на рабочий узел будет действовать сила сопротивления грунта резанию P_p . В процессе копания грунта будет действовать сила сопротивления копанию P_k , которая, по сути, является суммой всех сил, действующих на режущий инструмент. Эти силы показаны на рисунке 1.2. Там же изображены углы режущего инструмента при его взаимодействии с грунтом.

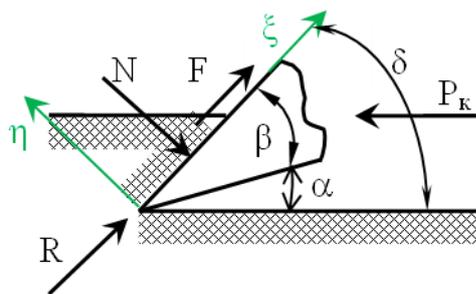


Рисунок 1.2 – Силы, действующие на нож при копании грунта

Нормальная сила N действует на переднюю поверхность ножа. Движение грунта по передней поверхности происходит с необходимостью преодоления силы трения F . Через R обозначена реакция грунта на режущий инструмент.

Сила сопротивления копанию P_k определяется из следующего соотношения (без учета возможности использования прицепной машины) [43, 44]:

$$P_k = P_p + P_{с.с} + P_{п.в},$$

где P_p – сила сопротивления грунта резанию;

$P_{с.с}$ – сопротивление стружки;

$P_{п.в}$ – сопротивление перемещению призмы волочения.

Согласно [43, 44] сила сопротивления грунта резанию определяется следующим образом:

$$P_p = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} (1 + 2,6 \cdot l) (1 + 0,01 \cdot \delta), [H],$$

где C – число ударов плотномера;

h – глубина резания, см;

l – длина режущей кромки ножа, м;

δ – угол резания (см. рисунок 1.2), град.

Силы сопротивления определяются из следующих соотношений:

$$P_{с.с} + P_{п.в} = \Delta \cdot K_{сж} \cdot F + g \cdot q_{п.в} \cdot \gamma_r \cdot \operatorname{tg} \rho,$$

ρ – угол трения грунта по грунту;

Δ – коэффициент, связанный с величиной высоты отвала H ;

g – ускорение свободного падения;

$q_{п.в}$ – объем призмы волочения, m^3 ;

$K_{сж}$ – активная удельная (на единицу площади поперечного сечения стружки F) сила сопротивления вырезаемой стружки продольному сжатию (зависит от величины C);

γ_r – плотность грунта, $кг/м^3$.

Итоговое соотношение для силы копания, учитывающее зависимости величин F и $q_{п.в}$ от глубины резания h , записывается следующим образом [43, 44]:

$$P_k = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} (1 + 2,6 \cdot l) (1 + 0,01 \cdot \delta) + \\ + \Delta \cdot K_{сж} \cdot l \cdot h + g \frac{l(H - h)^2}{2 \operatorname{tg} \varphi_0 \cdot K_p} \gamma_r \cdot \operatorname{tg} \rho,$$

где φ_0 – угол естественного откоса;

$K_p = 1,05 \div 1,35$ – коэффициент, учитывающий степень разрыхления грунта.

Численные значения тангенсов улов трения для различных грунтов, коэффициента $\Delta(H)$, активной удельной силы сопротивления вырезаемой стружки продольному сжатию $K_{сж}(C)$ приведены в табличном виде в работах [43, 44].

Проекция усилия P_k на оси η и ξ (см. рисунок 1.2) определяются по следующим соотношениям:

$$P_\eta = P_k \cdot \sin \gamma; \quad P_\xi = P_k \cdot \cos \gamma.$$

То есть в данном случае имеет место одновременное действие растягивающего (или сжимающего) и изгибающего усилий. Рассматривая нож как консольную балку длиной l_6 , закрепленную на одном конце (место установки болтов), приходим к выражению для определения максимального внутреннего напряжения [41]:

$$\sigma = \frac{P_k \cdot l_6 \cdot \sin \gamma}{5 \cdot h_6^3} + \frac{P_k \cdot \cos \gamma}{30 \cdot h_6^2},$$

где h_6 – толщина ножа.

Данное соотношение позволяет провести дальнейшие расчеты по нескольким вариантам. Например, сформулируем условие прочности в виде неравенства:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b}.$$

Здесь через n_b обозначен коэффициент запаса по пределу прочности σ_b материала зуба. Данное неравенство обозначает, что при эксплуатации не допускается образование трещин. Отсюда приходим к соотношению, которое позволяет определить (после подстановки выражения для P_k) численным методом значение допустимой глубины резания:

$$\frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{P_k \cdot l_6 \cdot \sin \gamma}{5 \cdot h_6^3} + \frac{P_k \cdot \cos \gamma}{30 \cdot h_6^2}.$$

Использование в неравенстве температурной зависимости предела прочности материала зуба $\sigma_b(T)$ позволяет рассчитать допустимую глубину резания при повышенной/пониженной температуре эксплуатации:

$$\frac{\sigma_b(T)}{n_b} = \frac{P_k \cdot l_6 \cdot \sin \gamma}{5 \cdot h_6^3(T)} + \frac{P_k \cdot \cos \gamma}{30 \cdot h_6^2(T)}.$$

Вместо предела прочности материала зуба в указанном неравенстве можно использовать величину предела текучести материала σ_T или условного предела текучести $\sigma_{0,2}$. В этом случае речь идет об отсутствии пластических деформаций в рассматриваемом элементе при его эксплуатации.

В некоторых работах (например, [45]) расчет прочности заканчивается определением усилий, действующих на ДСМ в различных положениях машины.

Интерес представляют величины коэффициентов запаса прочности по пределам текучести и прочности. Данный параметр может использоваться как самостоятельно, так и при определении величин допускаемых напряжений для различных материалов и типов нагрузок. В таблице А1 (приложение А) приведены обобщенные сведения по величинам коэффициентов запаса для различных видов нагружения деталей. Нормативные (требуемые) коэффициенты запаса в зависимости от материала, нагрузки, конструкции принимаются в большинстве случаев расчета из интервала: $[n_T]$ – от 1,5 до 2,5; $[n_b]$ – от 2,5 до 5 [41].

Обращает на себя внимание факт большого разброса значений коэффициента запаса прочности, что говорит о необходимости «перестраховки» разработчика на этапе проектирования ДСМ из-за незнания фактического уровня нагрузок, неточности выбранных расчетных схем и моделей и т. п.

Еще один подход к назначению коэффициентов запаса прочности изложен в работе [46]. Авторами предложено определять коэффициент запаса прочности n как произведение трех коэффициентов:

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3.$$

Здесь коэффициент $n_1 = (1,2 \div 1,5)$ учитывает разницу между величинами нагрузок, вводимыми в расчет, и действительными значениями. При высокой достоверности расчетных нагрузок величина данного коэффициента может приниматься равной 1. Коэффициент n_2 учитывает зависимость запаса прочности от отношения σ_T / σ_b . Коэффициент n_3 назначают в пределах от 1,0 до 1,5 в зависимости от степени ответственности деталей.

На основании сказанного выше можно сделать вывод о том, что при проведении расчетов прочности рабочих органов ДСМ основными физико-механическими характеристиками являются пределы текучести и прочности на растяжение, а также предела выносливости для случая действия циклических нагрузок. Очевидно, что чем выше уровень предельных значений физико-механических характеристик, тем больше коэффициент запаса прочности элемента конструкции. Последнее обстоятельство позволяет уменьшать габаритные раз-

меры рассматриваемых элементов, а в конечном счете – снижать весовые характеристики изделия и его металлоемкость.

1.2. Основные способы повышения уровня механических характеристик сталей

1.2.1. О связи механических характеристик материалов с размером зерна

В последние годы отмечается рост научного и промышленного интереса к новому классу материалов, появление которого вызвано стремлением к миниатюризации в практике построения различных объектов. Эти материалы обладают необычной атомно-кристаллической решеткой и демонстрируют уникальные свойства. В России их называют ультрадисперсными (УДМ), а в западной литературе – наноструктурными (НСМ), или наноматериалами (НМ). К этому классу материалов (УДМ и НМ) относят материалы с размером морфологических элементов менее 100 нм [47].

Еще одна классификация данных материалов приведена в [48], где частицы подразделяются на три группы:

- наноразмерные (ультрадисперсные) от 1 до 50 нм;
- высокодисперсные от 50 до 500 нм;
- частицы микронных размеров от 500 до 10 000 нм.

В монографии [49] осуществлен подробный анализ существующих взглядов и подходов к классификации частиц по ее размерам. Авторы данного труда предлагают классификацию, представленную на рисунке 1.3. По этой классификации УДМ имеют размеры частиц от 10 до 100 нм. Такой же диапазон размеров частиц УДМ определен и в работе [50].

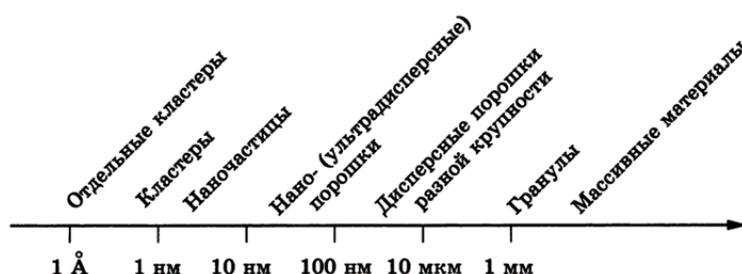


Рисунок 1.3 – Классификация дисперсных материалов по размерам частиц

При характеристике механических свойств материалов, имеющих мелкозернистую структуру, в первую очередь необходимо отметить высокий уровень микротвердости. При экспериментальном определении твердости на ее величину влияет множество факторов: неправильный выбор нагрузки и продолжительности нагружения, неперпендикулярность оси индентора к поверхности образца, наличие пор и т. п. Но главным образом твердость определяется пределом текучести материала [49, 51–54]. Зависимость предела текучести материала σ_T и твердости H материала от размера зерна описывается соотношением Холла – Петча [54]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_T \cdot d^{-\frac{1}{2}}; \quad H = H_0 + k_H \cdot d^{-\frac{1}{2}}.$$

Здесь σ_0 и H_0 – напряжение и твердость монокристалла;

k_T и k_H – постоянные.

Повышение прочностных характеристик материалов при их измельчении принято связывать с механизмом пластического деформирования. Наличие большого количества границ зерен, препятствующих продвижению плоских скопленных дислокаций и активизирующих дислокационные источники в соседних зернах, предполагает эстафетный механизм. Второй механизм, аккумуляционный, основан на предпосылке накопления дислокация на границах зерен в количестве, значительно превышающем количество зерен в поликристалле [54].

Кроме того, отмечается еще ряд особенностей поведения механических характеристик материалов при измельчении зерна. Во-первых, экспериментально доказано, что соотношение Холла – Петча соблюдается у некоторых материалов для напряжений, превышающих предел текучести. (Правда, в этом случае может иметь место зависимость σ_0 и H_0 от степени деформации [54].) Во-вторых, для некоторых критических размеров зерна наблюдается обратный эффект, т. е. с уменьшением размера зерна (в определенном диапазоне) происходит разупрочнение материала. Для иллюстрации этого на рисунке 1.4 показано изменение твердости сплава Ni – 25 ат. % W, полученного методом электроосаждения, в зависимости от размера зерна [49].

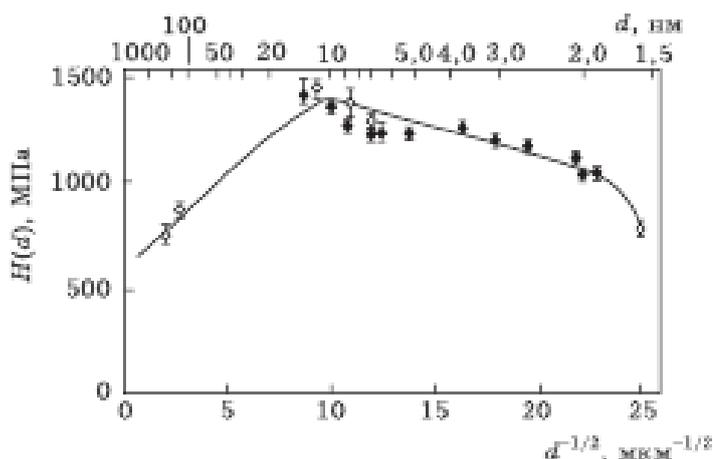


Рисунок 1.4 – Зависимость $H(d)$ сплава Ni – 25 ат. % W

Повышение прочностных характеристик приводит к одновременному снижению пластичности материалов – относительному удлинению δ . Данное обстоятельство хорошо иллюстрируется на примере кривых растяжения алюминия с разной величиной зерна, которые приведены на рисунке 1.5 (размер зерна представлен рядом с кривыми) [54].

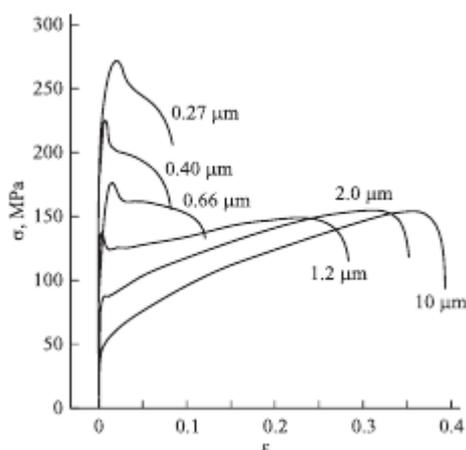


Рисунок 1.5 – Зависимости «напряжение σ – деформация ϵ » (Al 99,3 %)

Видно, что с уменьшением размера зерна вид кривой нагружения меняется и разрушение происходит практически без пластической деформации.

1.2.2. Термическая обработка сталей

Воздействие температуры на материал осуществляется с целью его упрочнения и является наиболее широко применяемым методом изменения структуры

материала и его свойств. Предпочтительно использовать плюсовые, высокие температуры, меньше – отрицательные. Воздействие температуры может быть осуществлено совместно с другими воздействиями: деформацией, электрическими, магнитными и химическими процессами.

Термическая обработка материала – это технологический процесс, в ходе которого происходят нагрев материала до некоторой температуры, выдержка при ней, а затем охлаждение с заданной скоростью. В рамках процесса происходит изменение структуры материала; заданные параметры технологического процесса обеспечивают необходимые (в том или ином случае) свойства. При этом размеры детали, подвергающейся термообработке, и ее форма не претерпевают изменения.

Требования к сталям и сплавам, применяемым в деталях конструкций, достаточно высоки, так как они должны обеспечивать надежную и длительную работу, зачастую в сложных эксплуатационных условиях. Высокая прочность и пластичность, способность противостоять ударным нагрузкам и распространению трещин, сопротивление усталости и износу, хорошо обрабатываться и свариваться – всё это перечень важнейших свойств, причем далеко не полный. В зависимости от сферы применения материала могут быть и дополнительные требования к материалу.

Термическая обработка бывает собственно термической, термомеханической, химико-термической и термоциклической [55–57].

Термическая обработка – это только действие температуры: процесс отжига, закалка и отпуск, старение материала. При отжиге материал нагревают до необходимой температуры, выдерживают и медленно охлаждают. В ходе процесса отжига уменьшается твердость, изменяются размер и форма зерна структуры и происходит снятие напряжений внутренних. При закалке материал нагревают до необходимой температуры, выдерживают и быстро охлаждают. При этом увеличиваются твердость и прочность, но пластичность и вязкость падают. За процессом закалки следует отпуск (нагрев до определенной температуры, выдержка и охлаждение). Отпуск обеспечивает повышение пластичности и вязкости, улуч-

шает структуру. Поверхностная закалка осуществляется лазером, токами высокой частоты, в расплаве металлов или солей.

Термомеханическая обработка – это действие температуры и пластическое деформирование. Существуют две ее разновидности: высоко- и низкотемпературная. Такая обработка обеспечивает более высокие прочностные и пластические свойства материала.

При *химико-термической* обработке соответственно имеем действие температуры и химического воздействия для получения необходимой структуры поверхностного слоя материала детали. Поверхностный слой насыщают разными химическими элементами (хром, алюминий, титан, бор и т. д.) в зависимости от цели проведения обработки. Часто такую обработку применяют к деталям, нуждающимся в улучшении твердости поверхности, антикоррозийной стойкости и усталостной прочности. Перечислим некоторые виды такой обработки: азотирование, цементация, нитроцементация.

Термоциклическая обработка подробно рассмотрена далее в главе 2.

1.2.3. Равноканальное угловое прессование

К значительному повышению уровня механических характеристик материала приводит использование интенсивной пластической деформации (ИПД), при которой происходят измельчение зерна металлических материалов и изменение структуры материала. ИПД подразумевает, что процесс проходит при высоких степенях деформирования и ведет к образованию определенной структуры: фрагментированной, разориентированной, беспористой, с размером зерна порядка 100 нм. Работы по разработке методов ИПД, их механизме, влиянии на структуру и свойства материала, а также по построению теоретических моделей процесса ведутся постоянно, о чем свидетельствует огромное количество трудов, посвященных этой теме [49, 51, 53, 58–66]. Применяются методы с многократным деформированием, в ходе которых размер и форма заготовки не претерпевают изменения. Широко используется и процесс моделирования, так как он позволяет прогнозировать деформацию (степень деформирования, размер получаемого зер-

на). Начиная с некоторой степени деформирования металлические материалы становятся изотропными, становясь идеально пластичными, когда величина напряжения не зависит от деформации. После этого дальнейшее повышение деформации ведет либо к очень незначительному изменению размера зерна структуры, либо к стабилизации размера. Повышение степени деформирования ведет к увеличению фрагментов в структуре материала, а также их разориентации. Разбиение структуры зерен исходного состояния материала на фрагменты, которые разориентированы, называется фрагментацией. При исходной крупнозернистой структуре фрагментация заканчивается при структуре с размером фрагментов порядка 0,2 мкм (среднее значение), что соответствует некоторой полученной пластической деформации. После этого в ходе ИПД появляется возможность значительно изменить состояние материала и его механические характеристики. При использовании ИПД до окончания фрагментации у материала имеем высокий уровень прочности. При применении ИПД после фрагментации получим и прочность, и пластичность материала. На результат процесса ИПД влияют многие факторы, такие как скорость и степень деформирования, температура процесса, а также физические характеристики обрабатываемого материала. К наиболее применяемым методам ИПД относят прокатку, ковку, прессование, волочение, экструзию через фильеру, КВД (кручение под высоким давлением) и РКУП (равноканальное угловое прессование). Наибольший интерес вызывают два последних метода. Это связано с тем, что их применение позволяет создать в материале ультрамелкозернистую и нанокристаллическую структуры.

Рассмотрим метод равноканального углового прессования – РКУП. Он основан на деформации сдвига больших (по размеру) образцов материала без изменения их поперечного сечения. Поэтому можно было деформировать их несколько раз. Позже этот метод получил развитие и служил для получения материалов с мелким зерном. В ходе процесса РКУП исходная заготовка материала 2 под действием нагрузки продавливается в конструкции, показанной на рисунке 1.6. Конструкция состоит из пуансона 1 и матрицы 3.

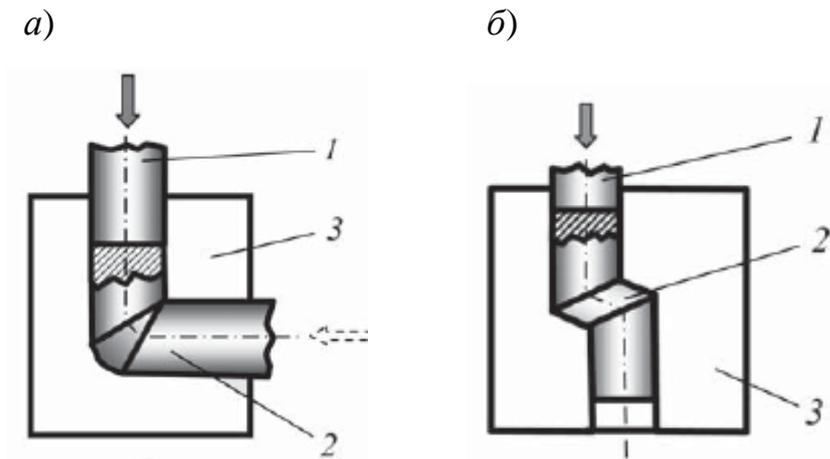


Рисунок 1.6 – Схема процесса РКУП:

a – РКУП; *б* – РКУП-ПК (равноканальное угловое прессование в параллельных каналах)

Заготовка может иметь круглое или квадратное поперечное сечение. Она испытывает сдвиговое деформирование в момент прохождения места, где соединены два канала, имеющие одинаковое (равное) поперечное сечение. Угол в месте соединения наиболее часто выбирают в 90° , но может быть и отличным от него. Процесс может проходить без повышения температуры или с таковым. Для достижения хороших результатов процесса необходимо определить оптимальное число проходов заготовки через матрицу и направление движения. Это называют маршрутом процесса. Бывает несколько видов маршрута:

- маршрут *A* – неизменная ориентация заготовки, вращения нет;
- маршрут *B* – после каждого прохода поворот на 90° , возможно вращение в одну или в две стороны;
- маршрут *C* – после каждого прохода поворот на 180° .

Заготовка материала испытывает многократную деформацию. Получаемая структура материала будет определяться его исходным состоянием, числом проходов и маршрутом. Можно измельчить зерно до размера 100 нм. Правда, не всегда удастся получить указанный размер во всем объеме материала. Наибольшие изменения затрагивают границы между зерен. Их структура становится неоднородной, у них большие углы разориентировки, что позволяет повысить прочность.

При этом улучшение зернограницного проскальзывания приводит к увеличению пластичности материала.

Кроме указания маршрута, числа проходов N , температуры процесса, важно иметь информацию о некоторых параметрах конструкции установки, используемой в процессе. Это углы – внешний Φ и внутренний Ψ (см. рисунок 1.7). Обычно $\Phi = 90^\circ$, а $\Psi = 0^\circ$, но они могут принимать и другие значения.

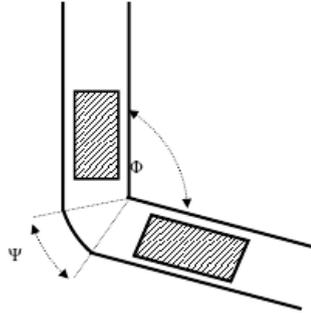


Рисунок 1.7 – Углы в установке для РКУП

Знание указанных параметров позволяет оценить величину деформации сдвига, используя зависимость

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \cdot \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right].$$

Метод РКУП достаточно прост при возможности достижения бóльших деформаций сдвига, приложении невысоких давлений (порядка 2 ГПа), а также обеспечения повторений прохода. Температуру процесса РКУП принимают не больше 0,4 от температуры плавления материала, а скорость деформирования невысока – от 0,01 до 0,1 с⁻¹. Вместе с тем его промышленное применение обладает и рядом технологических недостатков. Это невысокая производительность, малая длина заготовок, трудности с обслуживанием установки, а также отходы материала из краев заготовки (так как структура там неоднородна).

Возможно использование в установке второго канала с переменным (сужающимся) сечением по длине. Это позволяет создать противодействие усилию прессования. При таком процессе степень деформирования реализуется выше по отношению к варианту канала с одинаковым сечением. Соответственно, реализу-

ются более сильные изменения в структуре материала при одинаковом числе проходов. Такое переменное сечение позволяет получить еще более мелкое зерно в материале.

Для работы с протяженными заготовками метод РКУП был модернизирован и получил название РКУП Конформ. При данной схеме нагружения заготовка несколько раз подвергается прохождению вокруг круглого вала.

Результат процесса РКУП при получении мелкозернистой структуры с большеугловыми разориентированными границами зерен зависит от многих факторов, зачастую влияющих друг на друга. К ним относятся параметры установки, исходные физико-механические характеристики материала заготовки, особенности технологического процесса и т. д.

1.2.4. Кручение под высоким давлением

Деформирование образца кручением проходит на установках, подобных наковальне Бриджмена [56, 66], с матричным углублением (рисунок 1.8).

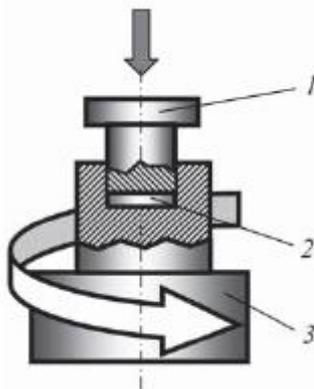


Рисунок 1.8 – Схема процесса КВД:

1 – пуансон, 2 – материал, 3 – матрица

Образец представляет собой тонкий диск (толщина до 1 мм) диаметром около 20 мм. Процесс сжатия осуществляется давлением в несколько гигапаскалей (ГПа). При вращении матрицы силы трения деформируют образец. При интенсивной сдвиговой деформации происходит изменение структуры материала образца: осуществляется фрагментация, увеличивается плотность дефектов, из-

мельчается зерно. Изменение в структуре ведет к изменению механических свойств материала. Деформация зерна образца неоднородна и определяется расстоянием от центра образца. Для получения более однородной структуры применяют увеличение числа оборотов пуансона. Размер зерна структуры зависит от исходных механических свойств материала, температуры процесса КВД и числа оборотов. Оценить сдвиговую деформацию образца $\gamma_{\text{КВД}}$ на расстоянии r от центра возможно, используя соотношение

$$\gamma_{\text{КВД}} = 2 \cdot \pi \cdot N \frac{r}{h_0}.$$

В приведенном соотношении N – число оборотов наковальни, а h_0 – исходная толщина образца. Число оборотов может варьироваться, достигая 5, 10 или 20. Давление может быть равно 6 или 8 ГПа, но иногда достигает и уровня 20 ГПа. Для сопоставления, в ходе процесса РКУП давление составляет порядка 2 ГПа. Такие давления позволяют в процессе КВД получить гораздо более мелкие зерна в новой структуре.

Рассмотренный метод КВД используется для заготовок, небольших по размеру. Кроме того, высокий уровень нагрузок в процессе работы ограничивает срок годности инструмента, снижая его стойкость.

1.2.5. Порошковая металлургия

На сегодняшний день разработан ряд методов получения порошковых материалов с наноструктурой. В идеале методы должны удовлетворять всем основным требованиям, изложенным ниже. На практике в силу объективных причин это выполняется не всегда. Основные требования к методам выглядят следующим образом [49]:

- высокая производительность;
- экономичность;
- получение материала с определенным, заданным размером зерен (частиц), с узким распределением их по размерам;

- обеспечение в ходе получения материала защиты поверхности его частиц от спекания и самопроизвольного окисления;
- получение материала с воспроизводимыми свойствами и контролируемым составом.

Наиболее объективная классификация методов основана на природе процесса, во время которого происходит получение наноматериалов, подразумевая деление на механические, физические, химические и биологические методы. Кратко рассмотрим их, так как подробное освещение можно найти в литературе — в частности, в [49, 68].

Механические методы характеризуются воздействием больших нагрузок (давление, изгиб, трение и др.), физические – физическими превращениями (закалка, испарение, термоциклирование и др.), химические – химическими реакциями (термическое разложение, электролиз и др.), биологические – биохимическими процессами белковых тел.

Механические методы включают, в частности, размол (измельчение путем истирания или удара), механическое действие разных сред (ультразвук, резонансная вибрация, ударная волна и др.). При механическом размельчении происходит ускорение процесса массопереноса и перемешивания, а также активизируется взаимодействие реагентов. Размол осуществляется в мельницах разного типа (шаровых, вибрационных, вихревых и др.). Для получения порошка лучше всего использовать струйные мельницы, так как измельчение осуществляется струями сжатого газа, скорость которых огромна. Процесс можно проводить в жидких средах. Кроме того, для устранения окисления возможно применение инертной среды в объеме. Минимальный размер получаемых частиц определяется природой исходного материала. Достоинства механического измельчения – универсальность и простота. Недостатки связаны со сложностью управления свойствами материала. Нелегко получить заданную форму частиц и одинаковые их размеры. Все методы механического воздействия производительны и предусматривают утилизацию отходов процесса; иногда происходит загрязнение материала составом рабочей среды.

Физические методы включают методы, использующие процессы превращения, распыления расплавов тончайшей струей жидкости или газа (вода, спирт, азот, аргон и др.), а также процессы испарения-конденсации. Метод, который использует превращение в материалах (например, кристаллизацию), дает возможность получить тонкий и объемный беспористый материал. Кроме того, проводят облучение сплава частицами с высокой энергией, используя циклические превращения, многократное охлаждение и последующий нагрев. Метод распыления производителен, экономичен и применим ко многим материалам. К отрицательным сторонам метода следует отнести стоимость оборудования, возможность окисления частиц и необходимость их защиты, а также большой разброс по размерам. Метод испарения-конденсации заключается в интенсивном нагреве и резком охлаждении. Существуют многочисленные способы нагрева (лазерный, электродуговой, плазменный и др.) и богатый выбор сред для охлаждения (масляный подслои, органические пленки). Процесс можно проводить в вакууме или инертной среде. При высокой производительности процесс очень трудоемок, требует дорогого оборудования и отмечен некоторой окисленностью полученных материалов.

Химические методы предусматривают химические, электрохимические реакции и одновременно физические и химические превращения. Это методы осаждения и соосаждения, гетерофазного взаимодействия, золь-гельный, методы восстановления и газофазных реакций, пиролиз (разложение), окисление. Использование электрического тока позволило задействовать методы электроосаждения, электрофлотационный метод, электролиз расплава солей, электрохимический синтез. Совместное химическое и физическое превращения применяют в процессе разложения соединений металлов (их паров) при действии излучений. Кроме того, нашли свое применение электродуговой разряд и синтез в пламени смеси газов. Многие из этих методов включают много стадий, невысокую производительность и частичное загрязнение материала. Тем не менее их положительные стороны не вызывают сомнений.

Биологические методы предполагают участие живых организмов естественного происхождения. Биологические объекты могут служить источником наноструктурных материалов при определенных условиях. Это железосодержащие белки в живых организмах, магнетотактические бактерии, моллюски.

С процессом получения нанопорошков связана проблема их склонности к образованию объединений частиц – агрегатов и агломератов [68].

Имея нанопорошки, можно получить из них изделие, применяя методы их объединения (консолидации) в объемное изделие. Для этого применяют определенные технологические процессы. К их числу можно отнести прессование – статическое или динамическое, холодное или горячее, с разным направлением нагрузки (одноосная, всесторонняя). Для большей эффективности иногда дополнительно используют воздействие высокоэнергетических источников: лазерного, ультразвукового, плазменного и др. Прессование в некоторых случаях сочетают с последующим высокотемпературным спеканием. Горячее прессование – это соединение прессования и спекания. Прокатка нанопорошков имеет некоторые отличия от традиционной прокатки. Объединение частиц порошка становится возможным благодаря пористости, т. е. наличию пор между ними. Происходит их уплотнение. Иногда для консолидации применяют метод экструзии, имеющий несколько видов: гидроэкструзия, газовая, прессование мундштучное. Последнее заключается в процессе продавливания порошка через отверстие с формой и размерами, совпадающими с соответствующими параметрами необходимой заготовки. Гидроэкструзия предполагает использование жидкости под высоким давлением, а при газовой экструзии применяют инертный газ.

1.2.6. Поверхностная обработка деталей

Повышение прочности поверхности детали может быть осуществлено наклепом, алмазным выглаживанием, путем закалки поверхности, воздействием лазерного излучения, а также легированием электроискровым способом [55, 67]. Указанные способы наиболее широко используются в практике поверхностной обработки деталей.

Для упрочнения материала прибегают к холодной пластической деформации, или наклепу. При такой обработке возрастает прочность, уменьшаются пластичность и стойкость к коррозии [55]. Наиболее популярный метод обработки – дробеструйная обработка. В этом случае на поверхность обработки воздействуют стальной или чугунной дробью, которая принимает ускорение в специальных дробеструйных установках центробежного или пневматического действия. Процесс длится не более 2÷3 минут. Толщина упрочненного слоя не превышает 0,4÷0,7 мм. В нем изменяются ориентация и форма зерен после обработки, а также возникают сжимающие напряжения, которые препятствуют трещинообразованию и их развитию. Дробеструйная обработка значительно повышает усталостную прочность. Особенно она интересна для деталей сложной формы, с галтелями, с концентраторами напряжений, с грубой механической обработкой поверхности.

Широко применяется обкатка роликами на токарных станках с привлечением специальных приспособлений. Поверхность упрочняется; кроме того, снижается ее шероховатость. Величина упрочненного слоя достигает до 15 мм.

Алмазное выглаживание (инструмент – алмазный кристалл) используют при обработке нежестких деталей, прочных материалов, для снижения шероховатости и упрочнения поверхности. Эффект от обработки сильно зависит от исходной структуры материала. Следует сказать и о вибровыглаживании, где применяют инструмент в виде сферы.

Закалка поверхности детали, так называемая поверхностная закалка, проходит не на всю толщину детали, а на небольшую, заданную и необходимую, глубину. Это позволяет сохранить среднюю часть детали незакаленной. После проведения такой операции повышаются твердость детали и ее стойкость к износу, а также усталостная прочность. Средняя, незакаленная часть детали (вязкая часть) хорошо гасит ударные нагрузки. Закалку поверхности осуществляют при нагреве токами высокой частоты или пламенем газокислородной горелки. Закалка токами высокой частоты позволяет получить высокодисперсную структуру материала, более твердую и прочную, чем при закалке в печи. Охлаждение после закалки

проводят в воде. Газокислородная горелка обеспечивает очень быстрый нагрев части поверхности, куда сразу же поступает из охладителя струя воды. Преимущество такого нагрева в том, что, перемещая по поверхности горелку и охладитель, можно обработать значительно бóльшую поверхность детали. Закалка пламенем сопровождается меньшими по величине деформациями, чем закалка объемная, и позволяет оставить более чистой поверхность.

Упрочнение лазером – это мгновенный, быстрый нагрев поверхности детали и такое же быстрое охлаждение. Результат обработки зависит от теплофизических и оптических свойств детали, так как происходит взаимодействие излучения с материалом. Процесс позволяет получить на поверхности детали особую структуру, с мелким зерном, с повышенным уровнем твердости, на 20÷30 % [55]. Лазерная обработка имеет ряд достоинств перед другими способами: бесконтактная, дозированная, она может проводиться в разных средах. При такой обработке повышаются твердость и стойкость к износу, но обработка не оказывает влияния на прочность и предел текучести материала.

При электроискровом легировании происходят достаточно сложные (термические, теплофизические и т. д.) процессы взаимодействия материала поверхности детали и искрового разряда. Зона упрочненного слоя имеет сложную слоистую структуру. Параметры процесса определяют величину упрочнения, которая может изменяться; от последней зависят свойства поверхности.

1.3. Цели и задачи исследований, проводимых в данной диссертационной работе

Цель диссертационного исследования заключается в установлении новых и уточнении существующих закономерностей изменения механических свойств материалов рабочих органов ДСМ, включая сварные соединения, в зависимости от реализуемой термоциклической обработки, обеспечивающей повышения надежности эксплуатации.

Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Провести поиск сведений, приведенных в научно-технической литературе, по путям получения мелкозернистой структуры сталей для повышения уровня их физико-механических характеристик, удовлетворяющих требованиям условий применения ДСМ.

2. Осуществить выбор объектов исследований и оценить объем исследований свойств сталей исходя из возможностей технологического и испытательного оборудования.

3. Провести комплекс исследований физико-механических и физических характеристик выбранных сталей и обработку полученных результатов. На основании полученных результатов построить математические модели, связывающие уровень физико-механических характеристик сталей с их структурой.

4. С использованием определенных физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5 провести расчетные исследования прочности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А, включая оценку чувствительности к концентраторам напряжений.

5. Провести сравнение показателей характеристик выбранных объектов исследований и обосновать выбор наиболее предпочтительного материала для изготовления деталей ДСМ с учетом выявленных закономерностей применения технологических приемов.

1.4. Выводы по главе 1

1. На основе решения задачи определения максимальных напряжений, возникающих в ноже бульдозера или автогрейдера при работе по перемещению грунта, показано, что основными механическими характеристиками материала ножа для обоснования его прочности являются пределы текучести и прочности. Данные характеристики играют ключевую роль при назначении коэффициентов запасов прочности в рамках различных типов действующих усилий (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и т. д.). Представлено описание методических подходов к назначению коэффициентов запаса прочности.

2. Рассмотрены пути повышения уровня механических характеристик материалов и прочности деталей: РКУП, КВД, термическая обработка, поверхностная обработка деталей и использование нанопорошков. Описаны эффекты влияния размера зерна на такие физико-механические характеристики, как твердость, пределы текучести и прочности, относительное удлинение при разрыве. Отмечено, что рост твердости и предела текучести материала описывается соотношением Холла – Петча.

3. Определены цель диссертационного исследования и задачи, которые необходимо решить для достижения цели.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМ МАШИНАМ. МАТЕРИАЛЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Основные требования к дорожно-строительным машинам

2.1.1. Классификация дорожно-строительных машин

Основной признак, по которому классифицируются ДСМ, – это характер выполняемых работ [69–71].

Строительство, содержание и ремонт дорог включает в себе большое число различных технологических операций. Наибольший объем затрат (до 80 %) идет на выполнение земляных работ. Обязательным элементом технологического процесса строительства дорог являются подготовительные работы, касающиеся площадки и полосы для прокладывания дороги. По своему функциональному назначению парк ДСМ может быть разделен на следующие группы [70]:

- **машины для подготовительных и земляных работ** – автогрейдеры, бульдозеры, грейдер-элеваторы, скреперы, экскаваторы и т. п.;
- **машины для добычи и переработки каменных материалов** – мельницы, дробилки, сортировочные и мочные машины;
- **машины для уплотнения грунтов и дорожного покрытия** – катки, трамбующие и вибрационные машины;
- **машины для строительства усовершенствованных дорожных покрытий облегченного типа** (асфальтобетон и цементобетон) – котлы, битумные насосы, битумохранилища, плавильни, парообразователи, распределители щебня и гравия, автогудронаторы и т. п.;
- **машины для приготовления и распределения асфальтобетона** – смесители, укладчики;
- **машины для приготовления бетона и строительства цементобетонных дорожных покрытий** – распределители, бетоносмесители, бетоноукладчики, нарезчики швов и т. п.;

➤ *машины для изготовления сборных железобетонных конструкций* – изготовление арматуры (правка, резка, натяжение), формование, уплотнение, пропаривание железобетонных изделий и т. п.;

➤ *машины для содержания и ремонта дорог* – снегоочистители, щетки, пескораспределители и т. п.

Существуют и другие квалификационные признаки. Помимо собственно строительства дороги, существует большое число технологий, сопровождающих это строительство (добыча и дробление каменных материалов, приготовление различных черных смесей, асфальтобетона, строительство инженерных сооружений из сборного железобетона и т. д.). Эти работы зачастую выполняются на специальных заводах, оснащенных соответствующим оборудованием, о чем было упомянуто ранее. Такое разделение по месту базирования ДСМ приводит к появлению в их классификации двух групп – базовые (заводские) и линейные (непосредственно связанные со строительством дороги) [70].

ДСМ могут классифицироваться по характеру действия рабочего органа – прерывного, циклического или непрерывного действия. При этом характер действия рабочего органа определяет конструкцию машины и область ее применения. Еще одним квалификационным признаком может служить типоразмер, в соответствии с которым машины подразделяются на очень большие, большие, средние, малые и очень малые.

2.1.2. Критерии работоспособности дорожно-строительных машин

Основными критерии работоспособности ДСМ — это прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость и виброустойчивость [72, 74–76]. На рисунке 2.1 данные критерии представлены с привязкой к геометрическим параметрам деталей и свойствам материалов, из которых они изготовлены.

Значение того или иного критерия для данной детали зависит от ее функционального назначения и условий работы. Например, в случае крепежных винтов основные требования касаются прочности, а винтов резьбовых передач – износостойкости.

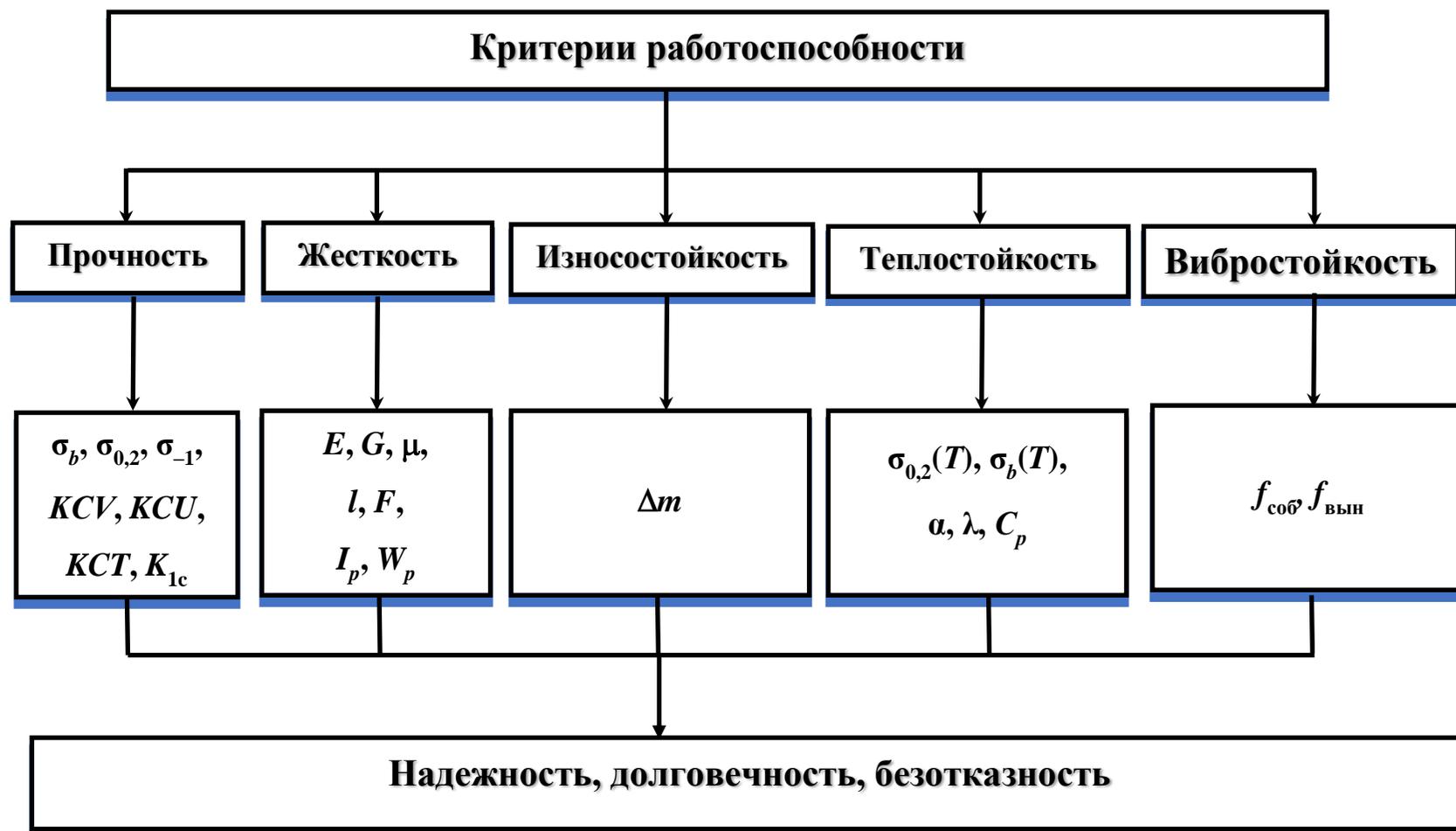


Рисунок 2.1 – Критерии работоспособности ДСМ

Для большинства деталей основным критерием их работоспособности является *прочность*. Необходимо различать статическую прочность и сопротивление усталости. Потеря статической прочности (разрушение) происходит тогда, когда действующее напряжение превышает предел статической прочности σ_b . Такая ситуация может возникнуть при действии нагрузок, превышающих расчетные уровни (перегрузки), либо при наличии скрытых дефектов деталей.

Потеря сопротивления усталости связана с длительным воздействием на деталь переменных напряжений, превышающих предел выносливости материала σ_{-1} . Причем наличие различных концентраторов в конструкции детали (канавок, раковин, царапин, трещин и т. д.) существенно снижает предел выносливости.

Со способностью материала поглощать энергию удара связано наличие характеристик ударной вязкости *KCV* (образец с острым V-образным надрезом), *KCU* (образец с U-образным надрезом) и *KCT* (образец с трещиной).

В последнее время стали широко применяться исследования по определению ресурса работы деталей с трещиной. Для этих целей используются параметры трещиностойкости (например, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic}).

Прочность деталей из сталей во многом определяется стойкостью к различному виду коррозионных воздействий, а также наличием сварных соединений. Последние, вследствие специфического воздействия температуры, могут сыграть роль источника дефектов (поры, трещины и т. п.) либо выступить в роли элемента, ослабляющего несущее сечение детали.

Жесткость характеризуется изменением размеров и формы детали под нагрузкой. Суть расчета на жесткость состоит в ограничении упругих перемещений деталей в пределах, допустимых для конкретных условий работы. Для определения упругих перемещений при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге и кручении определяющими являются характеристики упругости материала: условный предел текучести материала $\sigma_{0,2}$, модуль упругости E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона μ , а также геометрические характеристики детали – длина l , пло-

щадь поперечного сечения F , полярный момент инерции сечения I_p и полярный момент сопротивления W_p .

Износостойкость характеризует способность детали сохранять размеры трущихся поверхностей в течение заданного срока службы. Она зависит от свойств выбранного материала, термообработки, шероховатости поверхностей, величины контактных давлений, наличия смазки, скорости скольжения и т. п. Сильное влияние на износостойкость оказывают коррозионные процессы. Расчеты на износостойкость проводят по величине допускаемого давления $[p_m]$. При экспериментальном определении используют величину изменения массы Δm .

Теплостойкость, как следует из названия термина, означает устойчивость конструкции к ее нагреву, который может вызвать негативные последствия. Они выражаются в снижении пределов пластичности $\sigma_{0,2}(T)$ и прочности материала $\sigma_b(T)$, появлении ползучести, снижении защищающей способности масляных пленок, уменьшении величины зазоров между сопряженными деталями и т. п. При расчетах теплостойкости используют коэффициент линейного расширения α , коэффициент теплопроводности λ и удельную теплоемкость C_p .

Виброустойчивость связана со стойкостью конструкции к действию вибраций, которые приводят, как правило, к усталостному разрушению деталей. Особенно опасно явление резонанса, т. е. совпадения частоты собственных колебаний детали $f_{\text{соб}}$ с частотой вынужденных колебаний действующего усилия $f_{\text{вын}}$.

Собственная частота колебаний детали определяется модулем упругости E материала, из которого она изготовлена, и ее геометрическими характеристиками. Частота вынужденных колебания, по сути, является характеристикой действующего усилия.

В конечном счете представленный комплекс критериев работоспособности ДСМ через характеристики материалов отдельных деталей (физические, механические, теплофизические) и их геометрические параметры формирует такие взаимосвязанные показатели машины, как надежность, долговечность и безотказность работы.

2.1.3. Характер нагрузок, действующих на рабочие органы дорожно-строительных машин

В ходе рабочего процесса, выполняемого машиной, происходит изменение его показателей: усилий и скоростей операций, их величины и направления, длительности. Оно обусловлено рядом факторов. Среди них – конструкция машины, условия эксплуатации, рабочая среда и степень ее неоднородности. От этого зависят как нагрузки, которые испытывает конструкция машины, так и *режим* ее работы. ДСМ подразделяются на шесть режимных групп [69]. Первая группа – *очень легкий режим*. Режим можно охарактеризовать постоянной скоростью и неизменным направлением рабочих перемещений. Число включений в час – не более 50, а продолжительность работы с нагрузкой – не более 60 % от общего времени работы. Наибольшая нагрузка M_k превышает величину средней $M_{сн}$ не более чем в 1,2 раза (рисунок 2.2).

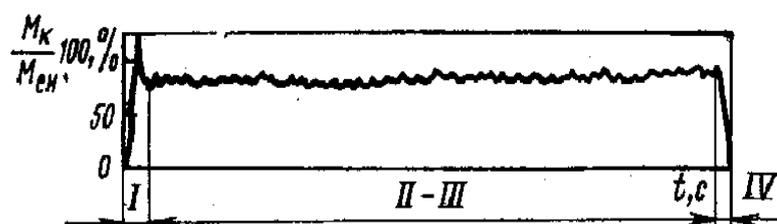


Рисунок 2.2 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку очень легкого режима для центробежного насоса

Здесь показаны разные временные интервалы работы машины и соответствующее изменение отношения крутящего момента (мощности двигателя) к средней нагрузке. Такой режим характерен для машин, используемых при сортировке и промывке материалов из камня, насосов, приводов смесительных машин.

Вторая группа – *легкий режим*. Такой режим характеризуется малым изменением скорости и постоянным (или очень редким) изменением направления рабочих перемещений. Число включений составляет от 50 до 100 в час. В процессе работы возможны пиковые нагрузки, не более чем в $1,2 \div 1,5$ раза превышающие величину средней нагрузки (рисунок 2.3).

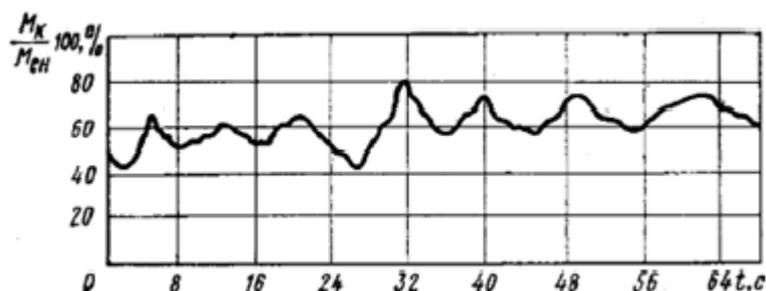


Рисунок 2.3 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку легкого режима для сверлильной машины (обработка дерева)

В таком режиме используются сверлильные машины, а также экскаваторы (многоковшовые) при работе с мягкими грунтами.

Третья группа – *средний режим*. При таком режиме скорость переменная, остановки движения отсутствуют, а направление рабочих перемещений практически неизменно. Число включений составляет до 200 в час, машина работает под нагрузкой продолжительное время. В процессе работы наибольшая нагрузка не более чем в $1,5 \div 2,5$ раза превышает среднюю величину (см. рисунок 2.4).

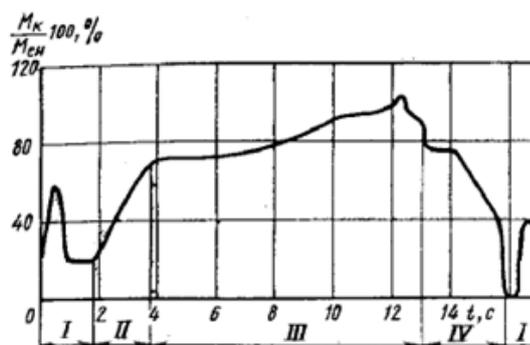


Рисунок 2.4 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку среднего режима для одноковшового погрузчика (мягкий материал)

Это режим работы экскаваторов, погрузчиков, землеройных машин в процессе разработки мягких грунтов.

Четвертая группа – *среднетяжелый режим*. Скорость при таком режиме изменяется от нуля до максимального значения. Число включений в час составляет до 300 раз. В процессе работы наибольшая нагрузка, не более чем в $2,6 \div 3,0$ раза превышает среднюю величину (рисунок 2.5).

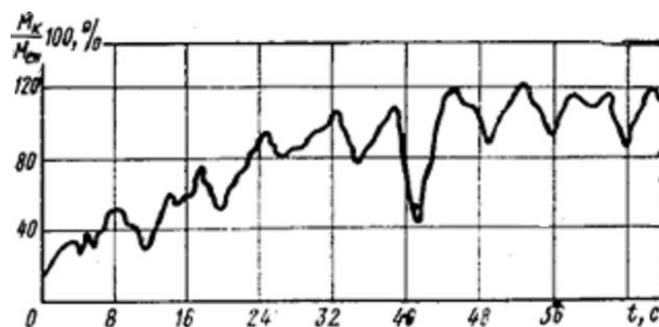


Рисунок 2.5 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку среднетяжелого режима для скрепера (крепкая глина)

В среднетяжелом режиме работают экскаваторы и погрузчики, а также землеройные машины в грунте средней величины крепости.

Пятая группа – **тяжелый режим**. Он характеризуется пиковыми нагрузками. Скорость рабочего движения при таком режиме изменяется и по величине, и по направлению. Число включений составляет до 1200 в час, машина работает под нагрузкой продолжительное время. В процессе работы наибольшая нагрузка более чем в 3,0 раза превышает среднюю величину. Велика частота изменения нагрузки: до 3 раз в течение $10 \div 15$ с (рисунок 2.6).

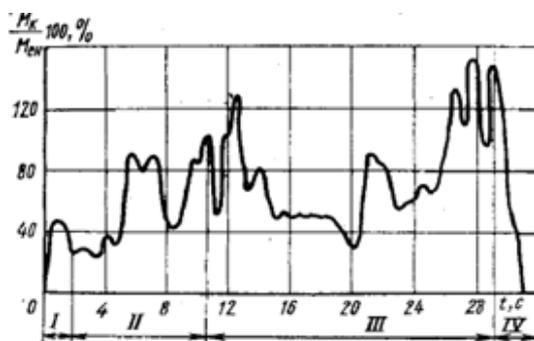


Рисунок 2.6 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку тяжелого режима для бульдозера (крепкий грунт)

В тяжелом режиме работают экскаваторы и погрузчики (крепкие грунты), бульдозеры, рыхлители и др.

Шестая группа – **очень тяжелый режим**. Он характеризуется ударным типом нагрузки. Число включений составляет до 2000 в час, машина работает под

нагрузкой продолжительное время. В процессе работы наибольшая пиковая нагрузка более чем в 4 раза превышает среднюю величину (рисунок 2.7).

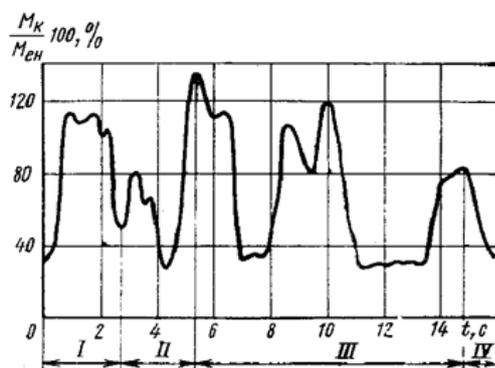


Рисунок 2.7 – Экспериментальная диаграмма, характеризующая нагрузку очень тяжелого режима для экскаватора (крепкий грунт)

Это режим работы в скальном грунте бульдозеров, экскаваторов. Римскими цифрами на рисунках 2.2–2.7 обозначены различные этапы рабочего цикла ДСМ.

2.1.4. Материалы деталей дорожно-строительных машин

Вне зависимости от области своего применения, любая машина состоит из отдельных деталей. Какие-то детали есть в каждой машине (гайка, болт, винт и др.). Это детали общего применения (назначения). Другие детали применяются в определенных типах машин (в частности, стрела крана или ковш). Это детали специального назначения. Группа деталей общего назначения обширна: это соединительные детали (болт, винт и др.), детали передач (зубчатой, цепной, червячной и др.), детали вращательные (вал, муфта и др.).

Процесс выбора материала для той или иной детали машины очень важен, так как от его выбора зависит качество детали, а следовательно, и машины. Процесс выбора материала осуществляется при учете следующих факторов [74]:

- обеспечение работоспособности детали с учетом надежности, износостойкости и прочности;
- удовлетворение требованиям по массовым и габаритным характеристикам детали и машины;

- удовлетворение специальным требованиям, связанным с областью использования детали и машины (свойства электроизоляционные, фрикционные; стойкость против коррозии и др.);
- возможность получения детали конкретной формы применением определенных способов обработки материала (технологичность);
- условия эксплуатации (среда, температура, нагрузка – статическая, динамическая, ударная, постоянная, переменная);
- отсутствие дефицита материала;
- стоимость материала и объем производства.

Огромное количество деталей, применяемых в машиностроительных конструкциях, изготовлено из металлических материалов [74]. Разъемные соединения (например, резьбовые), в зависимости от области применения и ответственности соединений, изготавливаются из недорогих низко- и среднеуглеродистых сталей 3, 10, 20, 35, 45, а также из легированных сталей 30Х, 30ХГСА. В неразъемных сварных соединениях применяют как низко- и среднеуглеродистые стали, так и низколегированные (например, 14ГС, 19Г, 09Г2, 15ХСНД). Для паяных соединений рекомендованы стали 3, 45, 30ХГСА, Х18Н9Т. В зубчатых передачах широко используют стали разной твердости в зависимости от степени нагружения зубьев колес. Это стали простые и легированные 40, 45, 50, 20Х, 40Х, 40ХН, 40ХН2МА, 25ХГТ, 25ХГМ, 30ХГСА, 38ХМЮА и др. Материалы для звездочек и цепей, которые сильно изнашиваются и испытывают воздействие удара, представлены сталями 15, 20, 45, 50, 20Х, 40Х и др. Для валов используют сталь 5 или стали 20, 45, 20Х, 40Х. В элементах зубчатых муфт (литых или кованных) используют углеродистые стали 45, 40Х, 45Л, в кулачково-дисковых – сталь 5 или 25Л, 15Х, 20Х. В муфтах с цилиндрическими пружинами применяют пружинные стали, в муфтах свободного хода – стали ШХ15.

В дорожно-строительных машинах, состоящих из отдельных частей, каждая из которых имеет свою функцию и назначение, сформированы сборочные узлы, в состав которых тоже входят отдельные детали. Многообразие деталей влечет за собой большое количество используемых материалов. При этом один и тот же

узел или рабочий орган может изготавливаться из разных материалов. Так, например, нож отвала бульдозера выполняется из легированных и углеродистых сталей: 110Г13Л, 65Г, 09Г2С, 15ХСНД, Ст5 (с наплавкой) и др. [77].

2.1.5. Материалы и объекты исследований

В качестве материалов для исследований в данной диссертационной работе используются стали 09Г2С и 30MnB5.

Объектами испытаний являются физико-механические характеристики исследуемых сталей, которые формируют комплекс параметров, определяющих работоспособность ДСМ. К таким характеристикам относятся:

- условный предел текучести $\sigma_{0,2 \text{ рас}}$, предел прочности $\sigma_{b \text{ рас}}$, относительное удлинение δ и относительное сужение ψ при испытаниях на растяжение;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2 \text{ сж}}$ при испытаниях на сжатие;
- прочность при изгибе $\sigma_{b \text{ и}}$;
- предел выносливости σ_{-1} ;
- износостойкость по изменению массы образца Δm ;
- микротвердость, в том числе на сварных образцах;
- трещиностойкость K_{1c} .

В таблице 2.1 приведен химический состав исследуемых сталей.

Таблица 2.1 – Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	B
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03	–
30MnB5	0,27÷0,33	≤0,40	1,15–1,45	≤0,035	≤0,025	–	–	≤0,40	0,0008÷0,0050

Для стали 09Г2С приведен фактический состав плавки. Химический состав стали 30MnB5 взят из нормативных документов.

2.2. Формирование комплекса характеристик сталей для обоснования возможности замены

2.2.1. Общие требования по качеству к материалам, деталям и дорожно-строительным машинам

Качество изделий определяется как совокупность свойств, обеспечивающих способность изделий выполнять определённые функции в соответствии с их назначением [78].

Показатели качества могут относиться к одному свойству (единичный показатель) или к нескольким свойствам (комплексные показатели). Применительно к изделию в целом следует применять интегральные показатели, которые учитывают эффективность его использования и затраты на изготовление и эксплуатацию. Количество требуемых показателей определяется назначением ДСМ [79].

Требования по качеству – неотъемлемая часть всех этапов жизненного цикла изделий (ДСМ): проектирования, исследования характеристик, изготовления и эксплуатации. Основной характеристикой как отдельных деталей, так и изделия в целом является качество выполнения ими своих назначенных функций.

Требования к ДСМ, отдельным деталям и материалам можно разделить на следующие группы:

- требования по надежности;
- эксплуатационные требования;
- технологические требования;
- экономические требования.

Рассмотрим подробнее каждую из этих групп.

2.2.2. Требования по надежности

Основной показатель эффективности работы машиностроительного изделия – его надежность. Уровень надежности изделия устанавливается в техническом задании на разработку. Далее идет распределение данного уровня между системами ДСМ (силовые установки; рабочее, ходовое, функциональное оборудо-

вание; передаточные механизмы; система управления и несущая конструкция) [79, 80].

Выход из строя любой одной системы влечет за собой выход из строя всей ДСМ. Такое соединение систем называется последовательным. Безотказная работа ДСМ является независимым событием, так же как и безотказная работа ее семи систем P_k . Вероятность P безотказной работы ДСМ получим по теореме умножения для независимых событий [81]:

$$P = \prod_{k=1}^7 P_k.$$

Если вероятности безотказной работы каждой из систем равны, и выполняется равенство $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_k$, то мы получаем соотношение для определения вероятности P_k :

$$P = P_k^7.$$

Отсюда следует, что для каждой системы ДСМ требуемый уровень надежности P_k должен быть выше требуемого уровня надежности всей машины P . Так, например, если требуется обеспечить $P = 0,95$, то уровень P_k должен быть равным 0,993.

В конечном счете общий уровень надежности доводится до деталей. Это позволяет (через определение коэффициента запаса) сформулировать требования по уровню механических характеристик материала конкретной детали, необходимых для выполнения условия обеспечения надежности. Величина этого коэффициента запаса отличается от коэффициента запаса прочности, который назначается из условия обеспечения прочности или отсутствия пластических деформаций материала (см. п. 1.1).

На рисунке 2.8 показаны распределения двух параметров – действующей нагрузки q и несущей способности детали r . Данные распределения характеризуются средними значениями a_q и a_r , а также коэффициентами вариации ω_q и ω_r . Если рассматривать коэффициент запаса прочности как отношение минимального

значения несущей способности и максимального значения действующего усилия, то приходим к следующему соотношению [82]:

$$k = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - \gamma^2 \omega_r^2)(1 - \gamma^2 \omega_q^2)}}{1 - \gamma^2 \omega_r^2},$$

где γ – гауссовский уровень надежности.

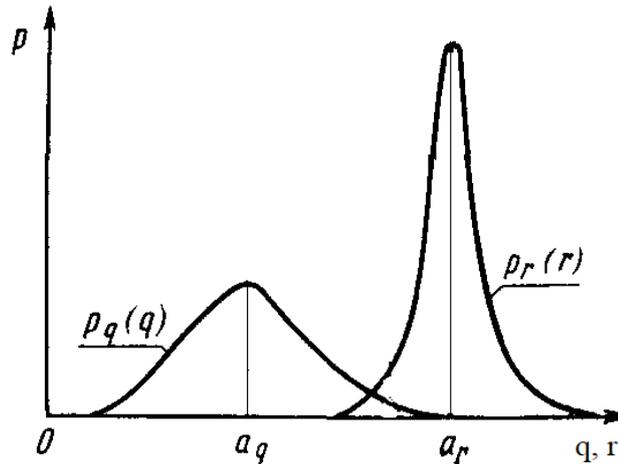


Рисунок 2.8 – Распределения нагрузки и несущей способности

В работе [82] в целях наглядности приведены зависимости данного коэффициента запаса k от уровня нормативной надежности, вычисляемого через γ , для различных коэффициентов вариации ω_q и ω_r при условии их равенства.

Этот же подход в данной диссертации использован для сравнения двух материалов с разными уровнями прочностных характеристик.

2.2.3. Эксплуатационные требования

Эффективность работы ДСМ напрямую зависит от условий эксплуатации, которые подразделяются на три группы [83]:

1. Дорожные условия (техническая категория дороги, вид и качество дорожного покрытия, рельеф местности).
2. Транспортные условия (протяженность поездки, род перевозимого груза, коэффициенты использования пробега и грузоподъемности машины, коэффициент использования машины, среднее значение уклона дороги и т. п.).
3. Природно-климатические условия.

Первые две группы рассматриваются в случаях необходимости транспортирования ДСМ на базу для осуществления ТОиР или при передислокации на другую строительную площадку.

При рассмотрении природно-климатических условий учитываются такие параметры, как влажность и температура окружающей среды, высота над уровнем моря, туман, скорость ветра, агрессивность рабочей среды, солнечная радиация и т. д. Причем в некоторых случаях от материалов требуются разные свойства. Например, эксплуатация при высоких температурах формирует к материалу требование по обеспечению жаростойкости, а отрицательные температуры – по хладостойкости [79].

На рисунке 2.9 представлена схема комплексного воздействия климатических факторов и природных явлений на свойства материалов деталей и надежность дорожно-строительных машин [84]. Видно, что многочисленные природно-климатические факторы приводят к различным нарушениям работоспособности машин вплоть до отказов.

2.2.4. Экономические требования применительно к сталям 09Г2С и 30МпВ5

В последнее время все большее значение приобретают экономические требования к материалам деталей ДСМ. Особенно это касается массового производства.

Очевидно, что в первую очередь речь идет о минимизации стоимости ДСМ. Этого достигают различными путями, причем иногда экономические требования могут входить в противоречие. Примером тому может служить стремление к минимизации затрат на материалы, в том числе сталей. С одной стороны, использование материалов с ограниченной прочностью обеспечивает их преимущество перед более прочными материалами (например, перед легированными сталями) по стоимости. С другой стороны, это чревато увеличением габаритов деталей, т. е. ростом металлоемкости/материалоемкости. Последнее обстоятельство означает увеличение энергозатрат на изготовление деталей, что уже не является преимуществом.

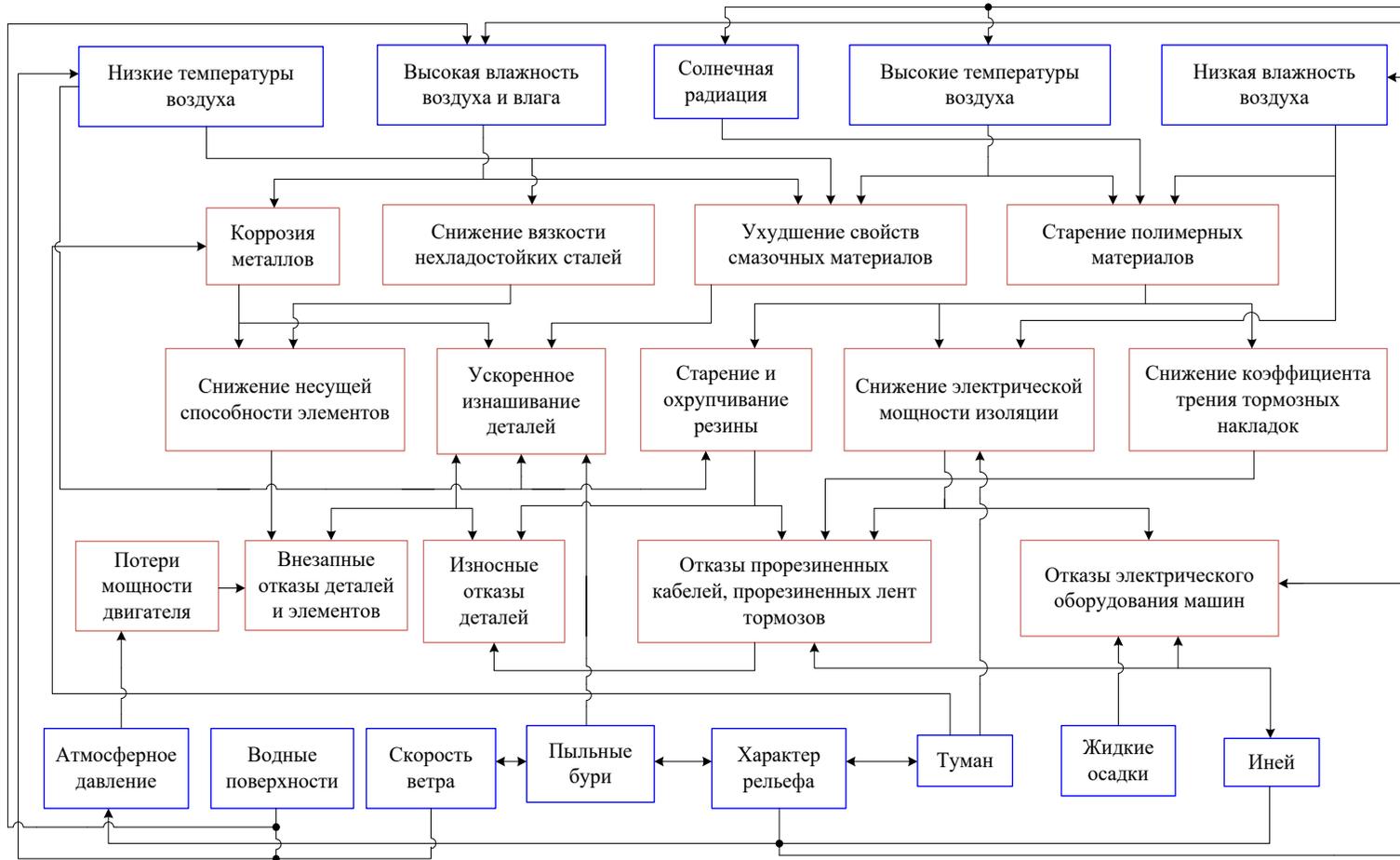


Рисунок 2.9 – Воздействие природно-климатических факторов
на свойства материалов деталей и надежность дорожно-строительных машин

Нельзя не отметить, что с экономической точки зрения легирование сталей нежелательно. Однако использование различных легирующих добавок оказывает многостороннее влияние на показатели работоспособности ДСМ. Поэтому решение об использовании легирования сталей должно приниматься с учетом не только одних лишь экономических соображений [79, 80].

В таблице 2.2 показано качественное влияние легирования на некоторые характеристики сталей [79]. Приняты следующие обозначения: ↑ – повышает, ↑↑ – сильно повышает, ↑↑↑ – очень сильно повышает; ↓ – понижает, ↓↓ – сильно понижает, ↓↓↓ – очень сильно понижает.

Таблица 2.2 – Влияние легирования на некоторые характеристики сталей

Характеристики сталей	Элементы								
	Mn	Si	Cr	Ni	W, Mo	Ti, V	B	V, >0,02%	C
Прочность	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑
Хладостойкость	–	↓	↑	↑	↑	↑	↓↓	↓↑	↓
Прокаливаемость	↑	↑	↑	↑	↑↑	↓	↑↑↑	↑	↑
Склонность к перегреву	↑	↓	–	–	↓	↓↓	↓	↓↓	↓
Обезуглероживание	↓	↑↑	↓↓	↑	↓	↓	–	↓↓	↑
Графитизация	↓	↑↑	↓↓	↑	↓	–	↓	↓↓	↑↑
Стоимость	↑	↑	↑	↑↑	↑↑↑	↑	↑	↑↑	–

Как видно из таблицы 2.2, легирование комплексами Cr + Ni, Cr + Ni + Mo, Cr + Mn + Si и др. повышает показатели прочности и прокаливаемости сталей. Дополнительное введение небольших количеств V, Nb, Ni приводит к измельчению структуры, что также повышает механические характеристики сталей.

Кроме характеристик сталей, указанных в таблице 2.2, положительное влияние легирования фиксируется на таких показателях, как окалиностойкость и стойкость к коррозии [79].

Анализируя данные таблицы 2.1 по химическому составу исследуемых сталей, можно констатировать, что в стали 09Г2С содержание таких элементов как кремний, хром и никель, выше, чем в стали 30MnB5. Углерода, меди и бора больше в стали 30MnB5.

Разное содержание легирующих элементов в сталях, исследуемых в рамках данной диссертации, в разной степени сказывается на стоимости этих материалов. В итоге имеем (данные сайта <https://msk.pulscen.ru> на июнь 2022 года) следующие цены:

- сталь 09Г2С – от 47 000 до 61 000 руб./т;
- сталь 30 МпВ5 – до 52 000 руб./т.

2.2.5. Характеристика технологичности сталей 09Г2С и 30МпВ5

Конструкционная низколегированная кремнемарганцовистая сталь 09Г2С широко применяется в промышленности благодаря ее свойствам, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики, долговечность и надежность: высокой прочности, износостойкости, легкости в обработке, хорошей свариваемости, широкому температурному диапазону применения при сохранении свойств. Сталь позволяет уменьшать толщину изделий при сохранении прочности, тем самым снижая их массу. В машиностроении сталь используют для изготовления элементов конструкций, которые при эксплуатации испытывают значительные нагрузки.

Борированная высокопрочная сталь марки 33МпВ5 тоже обладает высокой прочностью, вязкостью разрушения и износостойкостью. Она технологична и нашла широкое применение в сельскохозяйственном машиностроении. Такая сталь используется при изготовлении ручных инструментов, ножей и режущих полотен, гусеничных цепей, износостойких накладок, ножей для грейдера и т. п.

Существует несколько критериев оценки качества конструкционных сталей по их химическому составу. Приведем соотношения, служащие для количественного выражения этих критериев [85].

Атмосферостойкость низколегированных сталей оценивается по величине индекса коррозионной стойкости CI :

$$CI = 26,01Cu + 3,88Ni + 1,20Cr + 1,49Si + 17,28P - 7,29Cu \cdot Ni - 9,10Ni \cdot P - 33,39Cu^2.$$

Граничное значение этого показателя – 6 [86]. Если значение меньше 6, то сталь не атмосферостойкая. Полученные значения данного и других критериев приведены в таблице 2.3. Следует отметить, что значение индекса CI для стали 09Г2С является характеристикой конкретной плавки с низким содержанием некоторых легирующих элементов.

Таблица 2.3 – Критерии оценки качества сталей 09Г2С и 30MnB5

Показатели	Марка стали	
	09Г2С	30MnB5
Индекс CI (коррозионная стойкость)	2,17	6,09
Углеродный эквивалент C_e		
Соотношение 1	0,38	0,56
Соотношение 2	0,34	0,54
Соотношение 3	0,37	0,53
Соотношение 4	0,35	0,56
Метод BWRA (соотношение 5)	0,18	0,37
Температура подогрева T, °С		
Соотношение 1	129	197
Соотношение 2	108	191
Соотношение 3	124	188
Соотношение 4	114	197
Коэффициент интенсивности жесткости K, H	207	207
Коэффициент P_{cm} (сопротивление образованию холодных трещин)	0,203	0,415
Максимальная твердость зоны термического влияния HV_{max}	339 < 350. Не склонна к образованию холодных трещин	521 > 350. Склонна к образованию холодных трещин
Показатель Н.С.С. (вероятность возникновения горячих трещин)	1,16 < 2. Вероятность образования горячих трещин отсутствует	5,85 > 2. Вероятно образование горячих трещин
Критерий $P_{г.г}$ (склонность к образованию горячих трещин)	25,43	76,53
Параметр ΔG (сопротивляемость трещинам при термообработке)	-1,97 < 0. Склонна к образованию горячих трещин при повторном нагреве при термообработке	-2,0 < 0. Склонна к образованию горячих трещин при повторном нагреве при термообработке

Существуют еще показатели PREN (эквивалентное число сопротивления стали питтинговой коррозии) и MARC (степень легирования стали для обеспече-

ния сопротивления коррозии), которые относятся к сталям, содержащим азот [87]. Поэтому для рассматриваемых сталей эти показатели не определялись.

Важным свойством сталей является свариваемость. Данный термин связан не только со способностью сталей образовывать сварные равнопрочные соединения, но и с режимами нагрева и охлаждения, позволяющими избежать образования холодных и горячих трещин. Оценка риска развития холодных трещин осуществляется с помощью углеродного эквивалента C_3 , коэффициента интенсивности жесткости K , коэффициента сопротивления образованию холодных трещин P_{cm} и максимальной твердости зоны термического влияния HV_{max} .

В процессе сварки, осуществляемой при высоких температурах (около температуры плавления), и термической обработки возможно образования горячих трещин. Характеристиками сталей с точки зрения образования горячих трещин являются показатель $H.C.S$, критерий $P_{г.т}$ и параметр ΔG [85]. Существуют четыре наиболее известные методики определения величины C_3 (см. соотношения 1–4 в таблице 2.3). После подсчета величины C_3 сталь относится к одной из четырех групп, характеризующих свариваемость и необходимость дополнительных термических воздействий.

Кроме этих четырех соотношений, существует британская методика BWR (British Welding Research Association). По ней для определения углеродного эквивалента используется соотношение 5, а стали классифицируются на пять групп.

Для определения численного значения углеродного эквивалента C_3 используются следующие соотношения [85].

Соотношение 1 (ГОСТ 27772–88, ГОСТ 19281–89):

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V + Nb}{14} + \frac{Cu}{13} + 5B + \frac{P}{2}.$$

Соотношение 2 (Европейская ассоциация сварщиков):

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr + V + Nb}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}.$$

Соотношение 3 (японская нормативная документация):

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4}.$$

Соотношение 4 (нормы Российских железных дорог – РЖД):

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ca + Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}.$$

Соотношение 5 (методика BWRA):

$$C_3 = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{V}{10} + \frac{Ni}{15}.$$

Согласно данным, приведенным в таблице 2.3, первые четыре соотношения относят сталь 09Г2С к третьей группе сталей ($C_3 = 0,35 \div 0,45$). Для данной группы свариваемость ограничена; здесь необходимы подогрев и термообработка перед сваркой, а во время сварки желателен подогрев. После сварки необходима термообработка. Сталь 30MnB5 относится к четвертой группе сталей ($C_3 > 0,45$). Что касается требований по термообработке и подогреву, то они практически совпадают со сталью 09Г2С, за исключением подогрева во время сварки, который из разряда желаемых переведен в категорию необходимых.

Расчет углеродного эквивалента по методике BWRA показывает, что сталь 09Г2С попадает в первую группу, в которой находятся стали, не склонные к образованию холодных трещин. Поэтому их сварка осуществляется без подогрева. Сталь 30MnB5 относится к четвертой группе, в которой стали склонны к образованию холодных трещин и должны свариваться с подогревом от 75 до 200 °С.

Для соотношений 1–4 (см. таблицу 2.3) температура подогрева T определяется из следующего соотношения [85]:

$$T = 350[(C_3 + 0,005 \cdot \delta) - 0,25]^{\frac{1}{2}},$$

где δ – толщина металла свариваемых деталей (в расчетах была принята величина $\delta = 3$ мм).

Коэффициент интенсивности жесткости K зависит от толщины свариваемого листа δ и определяется из соотношения

$$K = 69 \cdot \delta,$$

где δ – толщина свариваемых листов.

Данное соотношение справедливо для толщин листа не более 150 мм. В таблице 2.3 было приведено значение K , подсчитанное для $\delta = 3$ мм.

Коэффициент сопротивления образованию холодных трещин C_{cm} равен:

$$C_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{V + Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + 5 \cdot B.$$

С использованием коэффициентов K и C_{cm} определяется критерий трещинообразования:

$$P_c = P_{cm} + \frac{H}{60} + 0,25 \cdot \frac{K}{105}.$$

Здесь H – количество диффузионного водорода в металле сварного шва.

Твердость зоны термического влияния определяется из следующего соотношения:

$$HV_{max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr.$$

Превышение показателем твердости величины 350 говорит о том, что данная сталь в зоне термического влияния склонна к образованию холодных трещин. Вероятность возникновения горячих трещин при сварке оценивается по величине показателя Уилкинсона (H.C.S.), для вычисления которого используются данные о химическом состоянии стали:

$$H.C.S. = 1000 \cdot C \frac{S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}.$$

Горячие трещины начинают появляться при условии $H.C.S. > 2$ [88].

Критерий $P_{г.т}$ оценивает потенциальную склонность стали к возникновению горячих трещин и рассчитывается по соотношению

$$P_{г.т} = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P - 1.$$

При термической обработке сопротивляемость стали образованию горячих трещин оценивается по значению показателя ΔG , вычисляемому по уравнению:

$$\Delta G = Cr + 3,3 \cdot Mo + 8,1 \cdot V - 2.$$

При положительном значении данного параметра сталь не склонна к образованию горячих трещин при повторном нагреве в процессе термической обработки.

2.2.6. Комплекс характеристик сталей, сформированный для обоснования возможности замены материала

Принятие решения о замене одного материала детали ДСМ на другой – сложная расчетно-экспериментальная задача. Алгоритм решения такой задачи содержит в себе три основных этапа (рисунок 2.10):

1. Сбор сведений об условиях работы детали и необходимых физико-механических характеристиках материала, из которого она изготовлена и которые требуются для обоснования работоспособности данной конкретной детали.
2. Проведение аналитических (сопротивление материалов, теория упругости) и (при необходимости) численных (расчетные программы типа ANSYS) решений задачи по определению предельных параметров детали.
3. Собственно принятие решения о замене материала.

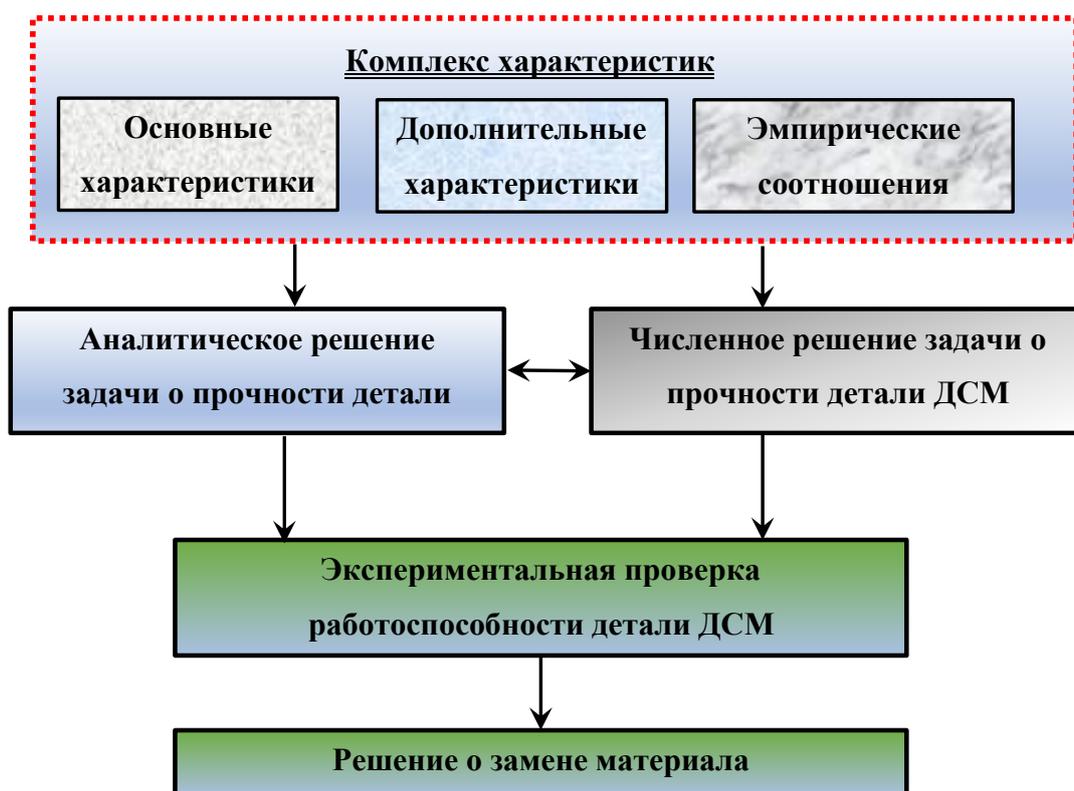


Рисунок 2.10 – Алгоритм принятия решения о замене материала

Основные характеристики материалов с привязкой к показателям работоспособности деталей и геометрическим параметрам деталей описаны в п. 2.2.2

и показаны на рисунке 2.1. Характеристики данной группы определяются экспериментально. Важным моментом является то, что определение механических характеристик при растяжении ($\sigma_{0,2}$; σ_b ; δ) предполагает наличие диаграммы деформирования материала «напряжение σ – деформация ϵ » при исследуемых условиях (температура и скорость деформирования).

Помимо основных характеристик, можно выделить еще группу дополнительных характеристик, расширяющих сведения о свойствах материала и его поведении при различных видах нагружения. Эти данные определяются расчетно-экспериментальным путем в рамках принятой модели материала.

Кроме того, в технической литературе есть сведения об эмпирических формулах, связывающих некоторые характеристики материала друг с другом. Эти соотношения основаны на анализе большого числа экспериментальных результатов и могут быть полезны для экспресс-оценки какой-либо характеристики материала в случае ее отсутствия.

Дополнительные характеристики не относятся к числу стандартных, т. е. определяемым по ГОСТам. Тем не менее их роль в описании поведения детали при ее нагружении представляется весьма значительной.

Например, определение параметра трещиностойкости K_{1c} представляет большие трудности, особенно для пластичных материалов. Однако, используя данные испытаний на одноосное растяжение (предел текучести σ_T и предел прочности σ_b), можно оценить данный параметр из соотношений [89]:

$$K_{1c} \approx 0,643 \cdot \sigma_T \frac{\frac{\sigma_b}{\sigma_T} - 1}{\sqrt{1 - \nu^2}},$$

где ν – коэффициент Пуассона. Размерность коэффициента 0,643 – $[M^{1/2}]$.

То есть критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} зависит не только от величины предела текучести σ_T , но и от отношения σ_b / σ_T . Следует отметить, что данное отношение σ_b / σ_T используется для пояснения факта проявления материалами пластических свойств при увеличении предела прочности и одновременном уменьшении относительного удлинения δ . С этой целью прово-

дится анализ экспериментальных результатов испытаний на растяжение и других видов нагружения с применением различных критериев пластичности $K_{пл}$. Например,

$$K_{пл} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} [47] \text{ и } K_{пл} = \frac{\psi}{1-\psi} [90].$$

В работе [91] введено понятие коэффициентов пластичности:

$$K_\delta = (1 - \delta)^{1/\delta} \text{ и } K_\psi = (1 - \psi)^{1/\psi}.$$

С помощью коэффициента K_δ установлена связь предела выносливости σ_{-1} сталей с пределом прочности σ_b :

$$\sigma_{-1} = K_\delta^{0,5} \cdot \sigma_b.$$

Также показано, что $\sigma_b = \sigma_T(1 + K_\psi)$ и $\sigma_T = \sigma_b \cdot K_\psi^{0,5}$.

При исследовании износостойкости сталей и сплавов был введен критерий, связывающий износостойкость I с величинами предела прочности σ_b , относительного сужения ψ и твердости HV [92]:

$$I = f(\sigma_b \cdot \psi + HV).$$

В технической литературе есть достаточное количество источников, в которых приведены различные эмпирические соотношения, касающиеся в основном пределов выносливости при различных видах нагружения. Приведем некоторые из них. Так, в работе [93] пределы выносливости углеродистых сталей определяются следующим образом:

- при изгибе $\sigma_{-1} = (0,40 \div 0,46)\sigma_b$;
- при растяжении или сжатии $\sigma_{-1p} = (0,70 \div 0,90)\sigma_{-1}$;
- при кручении $\tau_{-1} = (0,55 \div 0,65)\sigma_{-1}$.

Более широкий набор зависимостей предела выносливости при изгибе σ_{-1} и растяжении σ_{-1p} дан в работе [94]. Приведем некоторые из них:

$$\sigma_{-1} = 0,29\sigma_b + 7,92; \quad \sigma_{-1} = 0,45\sigma_T + 12,2;$$

$$\sigma_{-1} = 0,35S_k - 1,0; \quad \sigma_{-1p} = 0,31S_k - 5,3;$$

$$\sigma_{-1} = -0,50\delta + 44,60; \quad \sigma_{-1} = -0,234\psi + 65,60;$$

$$\sigma_{-1} = 0,138(\sigma_b + \sigma_T) + 20,50;$$

$$\sigma_{-1} = 0,877\sigma_T - 0,096S_k - 0,293\delta + 3,31; \quad \sigma_{-1} = 0,2(\sigma_b + \sigma_T + \psi).$$

Здесь прочностные параметры σ_t , σ_b , S_k (истинное сопротивление разрушению) выражены в килограмм-силах на квадратный миллиметр ($\text{кгс}/\text{мм}^2$), а относительное удлинение δ и относительное сужение ψ – в процентах.

Совокупность основных и дополнительных характеристик материалов, а также эмпирических соотношений, связывающих отдельные характеристики друг с другом, представляет собой **комплекс физико-механических характеристик**. Причем наличие такого комплекса полезен не только при решении задачи о замене материала конкретной детали, но и в рамках других задач, требующих знания величин физико-механических характеристик, т. е. представляют собой справочную информацию.

2.3. Термоциклическая обработка сталей

2.3.1. Теоретические основы метода термоциклической обработки сталей

В основе термоциклической обработки лежит учет природы материала и особенностей процессов структурных изменений. ТЦО состоит из периодически повторяющихся нагрева и охлаждения в режиме, который учитывает внутреннее строение материала и превращения в нем. Такая обработка позволяет за короткое время получить материал оптимальной структуры и управлять его свойствами; расширяя возможность создания более прочных материалов, на их основе можно совершенствовать элементы конструкции и машин в целом [95].

Многократная термообработка применяется для того, чтобы аккумулировать изменения, улучшающие качество материала и придающие им свойства, которые не могут быть получены при простой термообработке [96]. Отличие ТЦО от обычной термической обработки состоит в следующем: выдержки при постоянной температуре нагрева нет, а многократные нагревы и охлаждения проходят с оптимальными скоростями. Поэтому появилась характеристика числа циклов, т. е. интенсивности ТЦО (число циклов в единицу времени). Проведение процесса ТЦО, в отличие от обычной термообработки, не требует покупки допол-

нительного оборудования и материалов или обучении персонала. Процесс ТЦО прост и безопасен [97].

Доказана эффективность получения структуры с мелким зерном путем проведения термоциклической обработки (ТЦО) металлических материалов, в процессе которой происходят периодический нагрев и охлаждение. Режим такой обработки зависит от особенностей химического состава материала и его структуры. При проведении ТЦО в структуре происходят постоянные изменения, которые положительно влияют на свойства материала. Когда производится обычная термическая обработка, то структура определяется сначала начальным (исходным) состоянием, а затем конечным (после термообработки). Иначе дело обстоит при ТЦО. Здесь после каждого проведенного цикла структура будет разной. Это важно для последующих циклов, осуществления фазовых и структурных изменений, их протекания и механизма. В результате металлический материал имеет возможность приобретать такую структуру, которая недоступна при обычной термообработке. Благодаря ТЦО возможно получение структуры с мелким зерном необходимого размера и с более высокими характеристиками прочности. Использование ТЦО совместно с технологическими операциями, такими как закалка, старение (искусственное), отпуск и др., позволяет осуществлять регулирование промежуточных структур материала.

При ТЦО происходит накопление благоприятных изменений в структуре материала от цикла к циклу. Меняя количество циклов, получаем разные структуры и, следовательно, свойства. В ходе непрерывного изменения температуры совершаются фазовые превращения, возникают градиенты температуры и межфазные напряжения (из-за разных теплофизических характеристик фаз). Иногда все процессы проходят одновременно; в ряде случаев они минимальны или отсутствуют вовсе. Всё определяется материалом и режимом ТЦО. Рассматривая диаграммы состояния материала, можно увидеть, что возможны разные состояния структуры в зависимости от степени растворимости компонентов в материале. При полном отсутствии смешиваемости компонентов ТЦО ведет к микропластическому деформированию фаз и последующей рекристаллизации. Даже при очень малой

растворимости компонентов вместе с указанным выше процессом происходит диффузия атомов, способствующая изменению формы и размера избыточных фаз, а также перераспределению химических элементов в объеме [95]. При переменной растворимости компонентов происходит перераспределение элементов и видоизменение фаз, обусловленное многократным действием процесса «растворение – выделение» в ходе ТЦО. При полной растворимости возможна ситуация, при которой двухфазное состояние материала перестанет существовать. В этом случае преимущества и возможности ТЦО будут полностью исчерпаны. Могут возникнуть малые напряжения из-за наличия разориентировки зерен, текстуры и др. Полиморфные превращения, которые повторяются от цикла к циклу, – источник деформаций и напряжений. Соответственно, различают различные способы ТЦО [95]:

- с частичной или полной фазовой перекристаллизацией;
- в области температур, где существует переменная растворимость элементов друг в друге;
- в области температур дисперсионного твердения.

Все указанные способы связаны с фазовыми переходами 1-го рода, когда такие характеристики, как энтропия, энтальпия и микрообъем, испытывают скачок. Фазовые переходы обусловлены тем, что система стремится к состоянию, более выгодному с точки зрения энергии.

Для каждого материала определение режима ТЦО носит индивидуальный характер, так как материалы изначально различаются по составу и структуре. Результат ТЦО зависит от ряда следующих факторов [98]:

- химического состава;
- исходной микроструктуры;
- режима нагрева (максимум температуры, время, скорость);
- режима охлаждения (минимум температуры, время, скорость);
- индивидуальных особенностей материалов в процессе многих структурных и фазовых превращений в ходе ТЦО.

2.3.2. Сведения об имеющихся результатах термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30МнВ5

Применение пассивного феррозондового метода [99] позволило оценить структуру стали 09Г2С в исходном состоянии, после проведения деформационной и термообработки, после ТЦО. Кроме того, проводили оценку механических свойств материала после каждого цикла ТЦО.

Структура материала была получена путем холодной пластической деформации (дробная прокатка, степень деформирования составляла 50 %) и последующим рекристаллизационным отжигом ($20 \div 900$) °С. На рисунке 2.11 показана структура стали перед операцией прокатки и после нее.

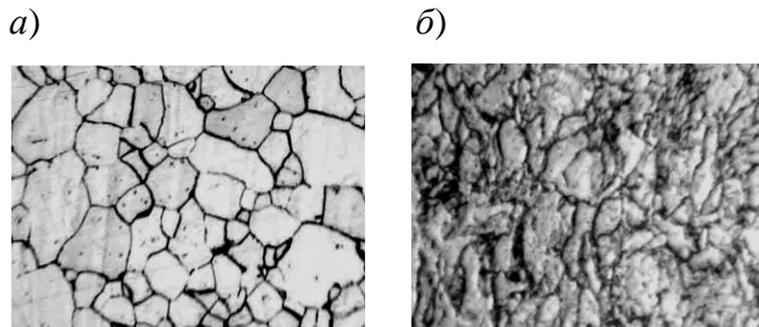


Рисунок 2.11 – Структура стали 09Г2С:

a – исходное состояние; *б* – после прокатки (деформация 50 %)

Металлографическое исследование показало, что для стали температуры начала и конца рекристаллизации составили соответственно 650 и 725 °С. На рисунке 2.12 видны структуры и их изменение после рекристаллизационного отжига.

После проведения обработки получили мелкозернистую и равноосную структуру.

Образцы из стали 09Г2С, находящиеся в трех различных начальных состояниях, подвергали ТЦО. Перечислим эти начальные состояния:

- первое начальное состояние – исходное;
- второе начальное состояние – исходное состояние плюс отжиг 900 °С;
- третье начальное состояние – исходное состояние плюс холодная прокатка (степень деформации 50 %).

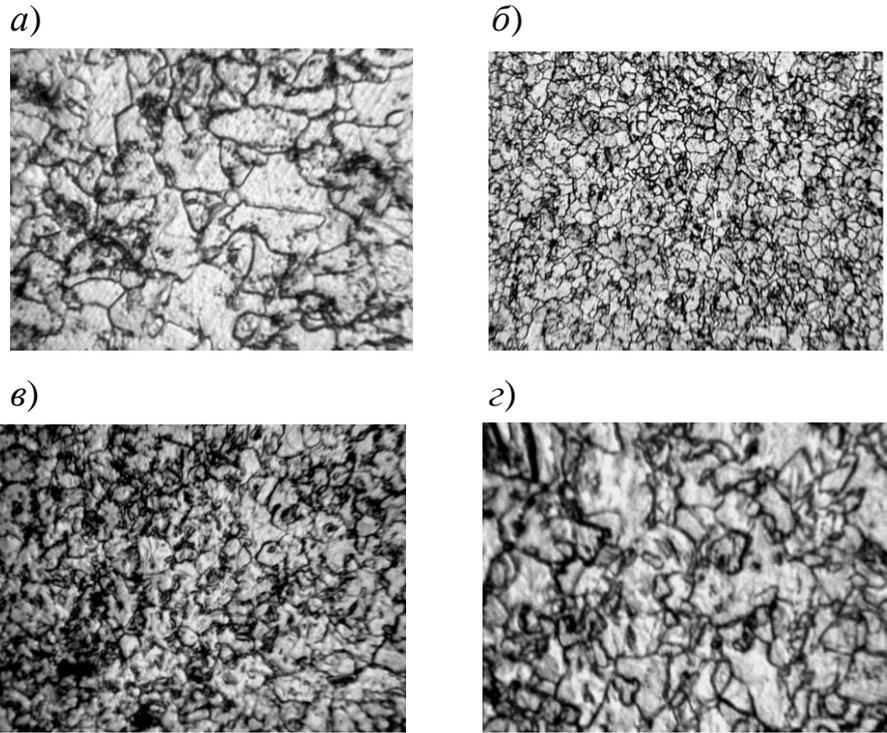


Рисунок 2.12 – Структура стали 09Г2С после прокатки (деформация 50 %) и отжига: *a* – 650 °С; *б* – 725 °С; *в* – 800 °С; *г* – 900 °С

На рисунке 2.13 представлены структуры, полученные в материале перед ТЦО и после нее, для всех начальных состояний.

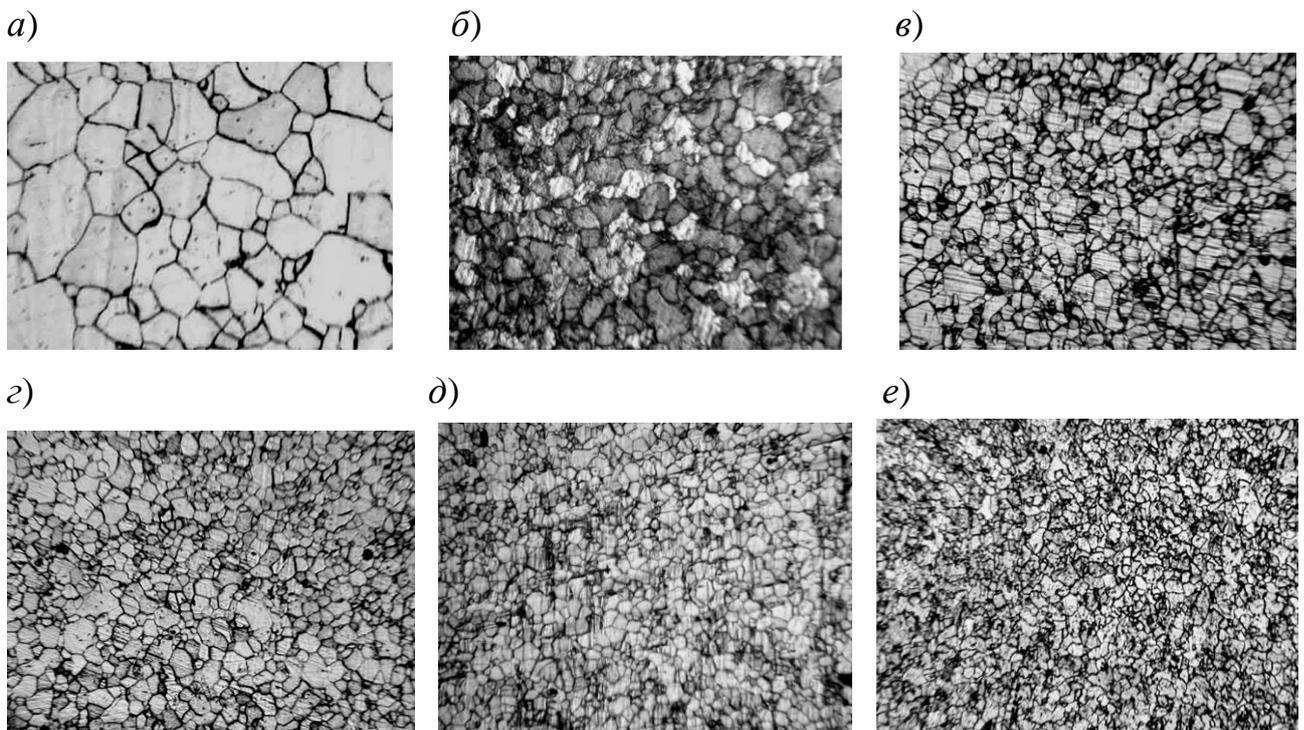


Рисунок 2.13 – Структура стали 09Г2С в ходе ТЦО:

a – первое начальное состояние (исходное состояние); *б–е* – после 1–5 циклов

На рисунках 2.14 и 2.15 показано изменение структуры образцов из стали 09Г2 после каждого цикла ТЦО от 1 до 5 для двух разных исходных состояний металла (второе и третье).

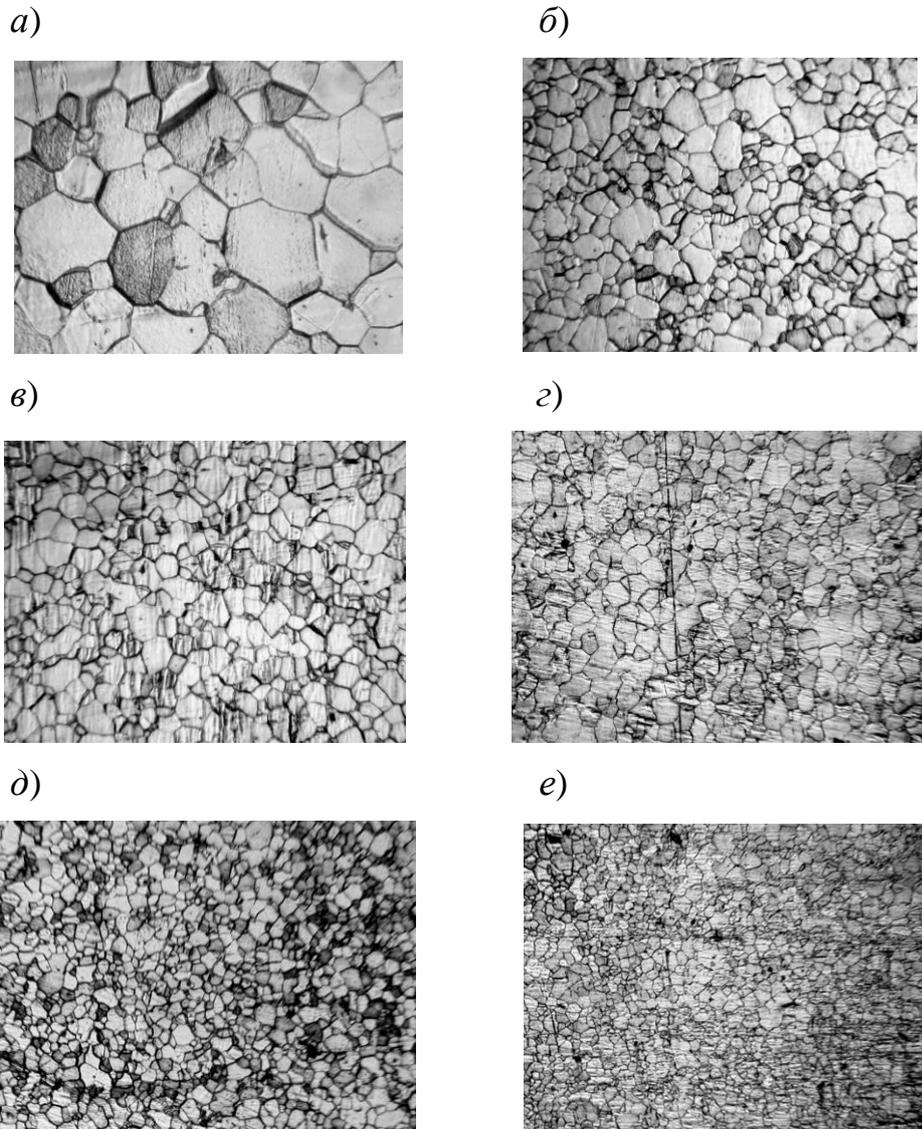


Рисунок 2.14 – Структура стали 09Г2С в ходе ТЦО:

a – второе начальное состояние (исходное состояние плюс отжиг 900 °С);

б – после одного цикла; *в* – после двух циклов; *г* – после трех циклов;

д – после четырех циклов; *е* – после пяти циклов

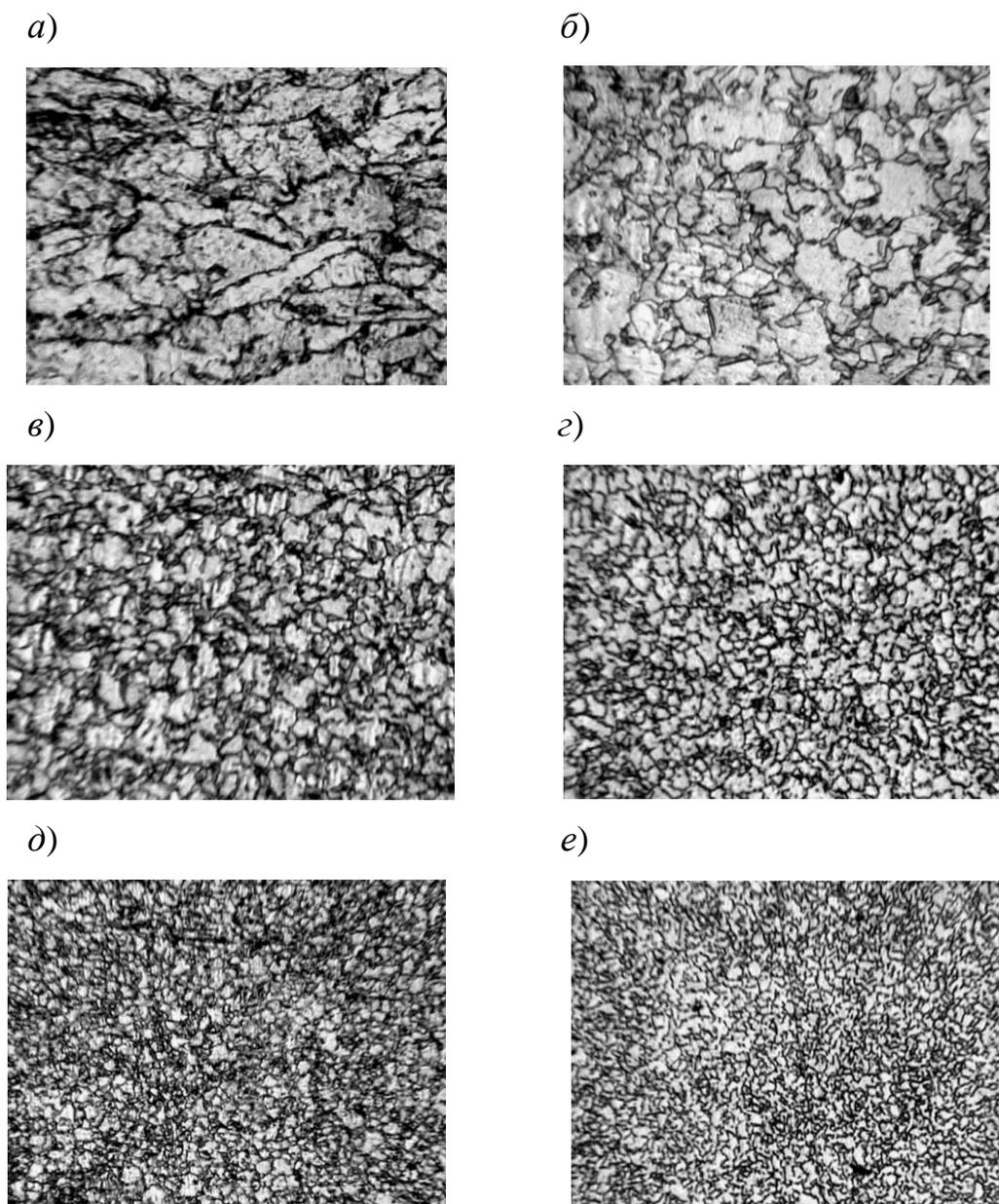


Рисунок 2.15 – Структура стали 09Г2С в ходе ТЦО:

a – третье начальное состояние (исходное состояние плюс прокатка, 50 %;

б – после одного цикла; *в* – после двух циклов; *г* – после трех циклов;

д – после четырех циклов; *е* – после пяти циклов

Металлография образцов материала показала, что во всех указанных выше состояниях (начальных), после проведения ТЦО в количестве двух циклов, формируется структура с мелким зерном. При дальнейшем увеличении числа циклов измельчение идет менее интенсивно. После первого цикла ТЦО структура имеет зерна с разным размером. Процесс измельчения протекает неравномерно:

в одних областях зерна измельчаются больше, чем в других. Когда число циклов возрастает, происходит измельчение во всех областях – там, где зерно было более крупным, и там, где было мелкое зерно после первого цикла. Сравнивая результаты ТЦО с тем же режимом, а сталь 09Г2С – с углеродистой сталью 08пс, удалось установить, что если для углеродистой стали разнотернистость значительно снижается после второго цикла, то для легированной 09Г2С – только после третьего. Очевидно, это связано с влиянием химического состава, наличием легирующих элементов и более медленным протеканием процесса изменения структуры. Следовательно, для легированных сталей число циклов, необходимых для создания структуры с мелким зерном, должно быть больше. Это замедление связано с тем, что у легированных сталей термодинамическая активность углерода ниже, чем у углеродистых. Чем больше процент содержания легирующих элементов в стали, тем больше нужно циклов, чтобы получить мелкозернистую и равноосную структуру [99].

Проведенные исследования показали, что начальное состояние стали перед проведением ТЦО имеет большое влияние на размер зерна, получаемый после ТЦО. Для второго начального состояния (исходное плюс отжиг 900 °С) с крупным зерном в структуре получаем и после ТЦО структуру с более крупным зерном. Для начального состояния третьего, с предварительной деформацией, после ТЦО имеем более мелкозернистую структуру, чем для второго начального состояния. Если учесть, что дефекты кристаллической решетки немало влияют на структуру в процессе структурных и фазовых переходов, то следует признать, что применение пластического деформирования как перед ними, так и во время их прохождения позволяет получить оптимальную структуру стали при ТЦО.

Отметим, что структура, созданная в стали в процессе ТЦО, определяет основные механические характеристики материала. В таблице 2.4 представлены результаты, полученные в ходе экспериментального исследования [99].

При увеличении числа циклов ТЦО повышается прочность стали; пластичность при этом мало изменяется. Основное повышение прочности наблюдается

после первых трех циклов, а последующие циклы мало изменяют механические характеристики.

Таблица 2.4 – Механические свойства стали 09Г2С

Характеристика	Количество циклов ТЦО					
	0	1	2	3	4	5
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	357	371	385	392	404	405
Предел прочности σ_b , МПа	446	468	482	491	499	502
Относительное удлинение δ , %	21,0	20,5	21,0	20,5	20,5	20,5

Предел текучести и предел прочности стали после ТЦО возрастает на 13 %. Увеличение числа циклов нагрева и охлаждения ведет к повышению интенсивности измельчения начальной структуры материала. Увеличение циклов до пяти способствует меньшему измельчению, но позволяет устранить разнотеренность в структуре. Легирующие элементы в составе материала и предварительное холодное пластическое деформирование дают возможность создания более мелкозернистой структуры.

Сведений о результатах ТЦО стали 30MnB5 в технической литературе не обнаружено.

2.3.3. Выбор режимов термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5, использованных при исследованиях

На основе представленных сведений о стали 09Г2С и предварительных экспериментов для стали 30MnB5, проведенных автором данной диссертационной работы, были выбраны следующие режимы предварительной термической обработки исследуемых сталей. Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 проводилась по следующему режиму: закалка (860÷900 °С) плюс отпуск (400÷600 °С).

Термоциклическая обработка заключалась в проведении десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение» [22, 24].

Состояние поверхности детали после механической обработки существенно влияет на ее работоспособность, коррозионную стойкость и износ [100]. Поэтому механическую обработку образцов для испытаний проводили с участием концентратора смазочно-охлаждающей жидкости, разработанным коллективом авторов при непосредственном участии диссертанта и защищенным патентом РФ [39].

2.4. Выводы по главе 2

1. Приведены классификационные признаки ДСМ. Основным признаком, по которому классифицируются дорожно-строительные машины, – специфика выполняемых работ. Кроме того, в качестве квалификационного признака могут выступать характер действия рабочего органа и типоразмер ДСМ. Описан тип нагрузок, воздействующих на рабочий орган машин.

2. Рассмотрены критерии работоспособности дорожно-строительных машин: прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость и виброустойчивость. Дана привязка данных критериев к геометрическим параметрам деталей и свойствам материалов, из которых они изготовлены. Рассмотрены материалы, традиционно применяемые в конструкциях ДСМ. В качестве материалов для исследований в данной диссертационной работе использовались стали 09Г2С и 30MnB5.

3. Требования по качеству – неотъемлемая часть всех этапов жизненного цикла изделий (ДСМ): проектирования, исследования характеристик, изготовления и эксплуатации. Основной характеристикой как отдельных деталей, так и изделия в целом является качество выполнения ими своих назначенных функций. Требования к ДСМ, отдельным деталям и материалам можно разделить на следующие группы: требования по надежности; эксплуатационные, технологические и экономические требования. В данной главе диссертации подробно рассмотрено каждое из них.

4. Описан алгоритм принятия решения о замене одного материала детали ДСМ на другой. Совокупность основных и дополнительных характеристик материалов, а также наличие эмпирических соотношений, связывающих отдельные

характеристики друг с другом, представляет собой комплекс физико-механических характеристик. Причем наличие такого комплекса полезно не только при решении задачи замены материала конкретной детали, но и в рамках других задач, требующих знания величин физико-механических характеристик.

5. Описаны принципы ТЦО сталей для повышения их механических характеристик. Проведен анализ имеющихся данных по результатам ТЦО сталей 09Г2С и 30MnB5. На основе представленных сведений о стали 09Г2С и предварительных экспериментов для стали 30MnB5, проведенных автором данной диссертационной работы, были выбраны следующие режимы предварительной термической обработки исследуемых сталей. Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 проводилась по режиму «закалка (860÷900 °С) плюс отпуск (400÷600 °С)». Термоциклическая обработка заключалась в проведении до десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

3. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Определение размера зерна

Определение среднего размера зерна проводили по методике, предусмотренной ГОСТ 5639–82 [101]. Для измерений был использован металлографический микроскоп Olympus SpinSR10 с системой количественного анализа изображений Thixomet. Программное обеспечение данного микроскопа предусматривает определение среднего размера зерна не только по ГОСТ 5639–82, но и по другим, зарубежным стандартам. Общее увеличение микроскопа с учетом увеличения окуляров составляет от 40× до 1000×.

В качестве образцов применялись диски с площадью наружной поверхности не менее 1 см². Подготовка шлифов проводилась по ГОСТ 5639–82 с использованием вспомогательного оборудования:

- прецизионный абразивный отрезной станок BRILLANT 220 для влажной резки;
- гидравлический пресс OPAL 460 для горячего прессования образцов перед полировкой с системой водяного охлаждения;
- шлифовально-полировальный станок Metapol 160E для шлифовки и полировки металлографических образцов.

3.2. Определение физико-механических характеристик сталей

3.2.1. Испытания на растяжение и сжатие

Испытания исследуемых материалов на растяжение проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892-84) [102]. Применялись цилиндрические образцы, тип III. Размеры образцов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Размеры образцов, использованных при испытаниях на растяжение

Размер	Материал	
	09Г2С	30MnB5
Диаметр, мм	3,63	3,44
Общая длина, мм	25,30	24,20

В ходе испытаний на растяжение фиксировались диаграммы нагружения «усилие – перемещение захвата» вплоть до разрушения образцов. По диаграммам нагружения определялись следующие характеристики: $E_{\text{рас}}$, $\sigma_{0,2\text{рас}}$, $\sigma_{b \text{ рас}}$, δ и ψ .

Отметим, что на первых этапах проведения исследований применялись нестандартные плоские образцы в виде пластин, результаты тестирования которых можно встретить в ряде статей [18, 22, 24, 25]. В рамках этой диссертации обрабатывались результаты испытаний только стандартных цилиндрических образцов.

Испытания материалов на сжатие проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 25.503–97 [106]. В качестве образцов применялись цилиндры диаметром 10 мм и высотой 20 мм (тип III).

В ходе испытаний на сжатие фиксировались диаграммы нагружения «усилие – перемещение траверсы». По результатам испытаний с участием диаграмм нагружения определялся условный предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2\text{сж}}$.

Испытания на растяжение и сжатие проводились на универсальной испытательной машине Instron 5969. Точность измерения нагрузки составляет $\pm 0,4\%$. Расположение образцов в испытательной машине проиллюстрировано на рисунке 3.1.

а)



б)



Рисунок 3.1 – Расположение образцов в испытательной машине:

а – испытание на растяжение; б – испытание на сжатие

Испытания на растяжение и сжатие проводились при комнатной температуре. Скорость деформирования составляла 1 мм/мин. При испытаниях на сжатие использовалась графитовая смазка, наносимая на торцевую поверхность.

При проведении испытаний на растяжение было зафиксировано образование шейки на образцах из обоих материалов. В целях иллюстрации на рисунке 3.2 показан образец из стали 09Г2С до и после проведения испытаний.



Рисунок 3.2 – Образец на растяжение до испытаний (а) и после (б)

В связи с этим был произведен пересчет диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » из относительных координат ($\sigma_{отн}$ и $\epsilon_{отн}$) в истинные ($\sigma_{ист}$ и $\epsilon_{ист}$) с использованием следующих соотношений [104–106]:

$$\epsilon_{ист} = \ln (1 + \epsilon_{отн}); \quad \sigma_{ист} = \sigma_{отн}(1 + \epsilon_{отн}).$$

Значения истинных величин напряжений и деформаций применялись при определении величин истинного предела прочности, а также при проведении расчетов прочности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А по программе ANSYS.

3.2.2. Испытания на изгиб

Изгиб образцов осуществлялся на испытательной машине Instron 5969 в соответствии с требованиями ГОСТ 14019–2003 [107].

Приспособление для проведения испытаний с деформированным образцом показано на рисунке 3.3. Диаметр нагружающего и опорных роликов составлял 9 мм. Расстояние между опорными роликами равнялось 22 мм.



Рисунок 3.3 – Приспособление для испытаний на изгиб

Испытания проводились при комнатной температуре. Скорость деформирования составляла 5 мм/мин. В ходе испытаний фиксировались диаграммы нагружения образцов.

Использованная схема трехточечного нагружения балки при испытаниях на изгиб показана на рисунке 3.4. При проведении испытаний на растяжение было зафиксировано пластичное поведение исследуемых сталей. В этом случае, согласно [108], оценить предельные прочностные характеристики материала невозможно. Поэтому в рамках данной диссертации по величине максимальной нагрузки оценивалось значение прочности при изгибе σ_{\max} и исследовалось влияние на нее количества циклов ТЦО.

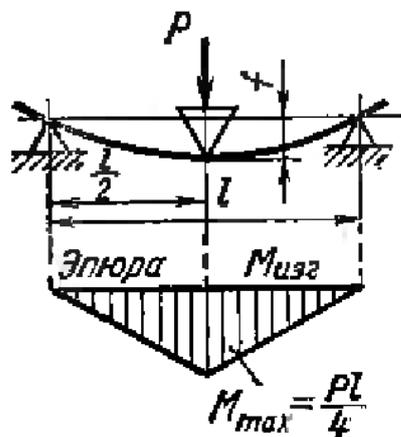


Рисунок 3.4 – Схема нагружения образца при испытаниях на изгиб

На схеме 3.4 показана эпюра изгибающего момента $M_{изг}$, из которой видно, что при данной схеме нагружения усилием P максимальные изгибные напряжения реализуются в центральной части по длине образца в крайних волокнах поперечного сечения образца.

Прочность при изгибе численно равна максимальному нормальному изгибному напряжению и определяется из соотношения [41, 108]:

$$\sigma_{\max и} = \frac{P_{\max} \cdot l}{4 \cdot W},$$

где W – момент сопротивления сечения образца;

P_{\max} – максимальное значения изгибающего усилия, определяемое по диаграмме нагружения.

Влияние касательных напряжений, возникающих от действия поперечной силы, не учитывалось вследствие их малости и реализации своего максимального значения на центральной оси образца, т. е. не в крайних волокнах.

Образец для изгибных испытаний имел призматическую форму с прямоугольным сечением шириной $b = 12$ мм и высотой $h = 6$ мм. Длина образца l составляла 30 мм. Момент сопротивления поперечного сечения образца определяется по соотношению

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}.$$

3.2.3. Определение предела выносливости

Циклические испытания материалов проводились на серво-гидравлической испытательной системе УТМ 100 кН. Погрешность измерения усилия составляет $\pm 0,5$ %. Погрешность измерений прогиба образца в зависимости от типа используемых датчиков – не менее ± 1 %.

Циклические испытания материалов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502–79 [109]. Были использованы плоские образцы, тип IV, толщиной 3 мм. Образцы для циклических испытаний вырезались из одношовной трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 мм.

Испытания проводились по схеме изгиба вращающегося образца, цикл нагружения был симметричный; коэффициент асимметрии цикла составлял величину 0,1. Испытания образцов проводились на базе $N_{ц} = 10^6$ циклов при трех значениях частоты нагружения:

- для стали 09Г2С – 2,0; 2,7 и 100 Гц;
- стали 30MnB5 – 2,0; 2,7 и 46,7 Гц.

По результатам испытаний определялись показатель сопротивления усталости; напряжение, соответствующее долговечности $N_{ц} = 10^6$ циклов; относительный коэффициент ограниченной выносливости χ .

Показатель сопротивления усталости определялся как тангенс угла наклона кривой усталости к оси количества циклов $N_{ц}$ по соотношению [110]:

$$\operatorname{tg} \alpha_W = \frac{d(\lg \sigma)}{d(\lg N_{ц})},$$

где σ – циклическое напряжение; $N_{ц}$ – количество циклов.

Напряжение $\sigma_{N_{ц}=10^6}$, соответствующее долговечности $N_{ц} = 10^6$ циклов, определялось по кривой усталости, построенной в логарифмических координатах:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \operatorname{tg} \alpha_W \lg N_{ц},$$

где σ – напряжение при достижении соответствующего количества циклов $N_{ц}$;

σ_0 – напряжение при $N_{ц} = 1$, отсекаемое линией кривой усталости;

$N_{ц}$ – количество циклов нагружения до разрушения.

Относительный коэффициент ограниченной выносливости χ определяется из соотношения [110]:

$$\chi = \frac{\sigma_{N_{ц}=10^6}}{\sigma_b}.$$

3.2.4. Определение твердости и микротвердости сталей и их сварных соединений

Определение микротвердости образцов и их сварных соединений осуществлялось с помощью универсального стационарного твердомера Dura Vision-30.

Абсолютная погрешность измерения твердости зависит от метода измерения, шкал и интервалов измерения (приведены в Приложении к свидетельству об утверждении типа средств измерений). Например, при измерении твердости по методу Виккерса по шкале HV30 в диапазоне (500 ± 5) единиц HV абсолютная погрешность измерения твердости составляет ± 10 HV.

В качестве образцов для измерения твердости сталей при различных количествах циклов ТЦО использовались образцы на растяжение (лопатки) после их разрыва с дополнительной полировкой мест крепления в захватах испытательной машины. Микротвердость определялась при нагрузке 10 Н, время выдержки под нагрузкой составляло 10 с.

Для определения микротвердости сварных соединений (основного металла – ОМ, материала сварного шва – СШ и материала зоны термического влияния – ЗТВ) были изготовлены сварные образцы, показанные на рисунке 3.5. Для исследований были взяты пластины из стали 30MnB5. Микротвердость сварных соединений из стали 09Г2С изучалась другими исследователями, результаты которых были привлечены для анализа (см. п. 4.1.6).

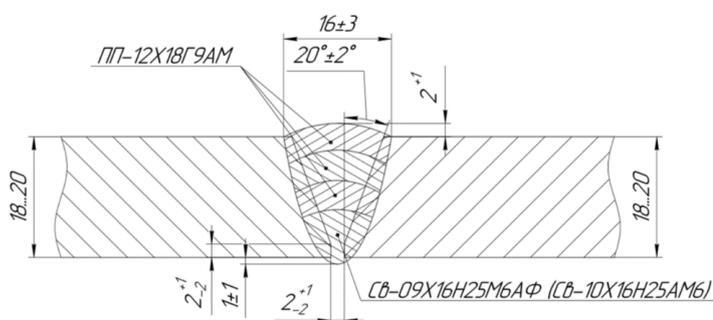


Рисунок 3.5 – Основные размеры элементов сварного шва

Режимы сварки получены учетом рекомендаций работы [111] и приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы сварки и используемые проволоки

Тип (марка) проволоки	$d_{э}$, мм	Режимы сварки					
		Шов	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	Вылет, мм	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин
СВ-09Х16Н25М6АФ	1,2	Корень	150	30	15	21,1	16÷18
ПП-12Х18Г9АМ	1,2	Заполнение	260	36	15	20,7	18÷20

При изготовлении образцов было использовано приспособление для жесткой фиксации свариваемых деталей, разработанное при непосредственном участии автора данной диссертации [5, 6]. Оно показано на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Приспособление для фиксации свариваемых деталей

3.2.5 Численное моделирование деформирования зуба ковша экскаватора

С целью оценки влияния пластических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5 были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния зуба ковша экскаватора. За основу геометрической модели зуба ковша экскаватора был взят эскиз, приведенный на рисунке 3.7 (зуб ковша экскаватора ЭКГ-5А).

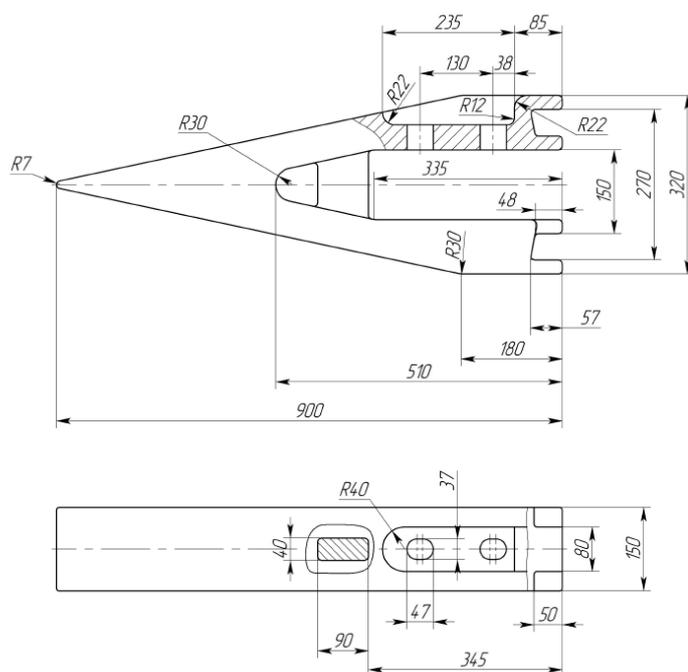


Рисунок 3.7 – Эскиз зуба ковша экскаватора

Основная цель расчета напряженно-деформированного состояния зуба состояла в оценке влияния пластических свойств сталей 09-2С и 30MnB5 на величину разрушающего усилия.

Трехмерная модель зуба создавалась в программе твердотельного моделирования SpaceClaim, входящей в состав САЕ пакета ANSYS [112–115]. Зуб наклонен на угол 20° по отношению к вертикальной оси Y . Необходимо отметить, что выбор модели зуба, угла его наклона и (далее) угла приложения нагрузки отчасти произволен. Этот момент не является определяющим в процессе расчетного моделирования условий работы зуба при эксплуатации, поскольку основная цель данного расчетного исследования заключается в сравнении предельных нагрузок зуба из разных сталей и разных состояний материала (разные количества циклов ТЦО).

Для удобства настройки граничных условий и постобработки результатов расчета единый объем зуба разбит на отдельные симметричные части. Места соединения отдельных частей показаны фиолетовым цветом (рисунок 3.8).

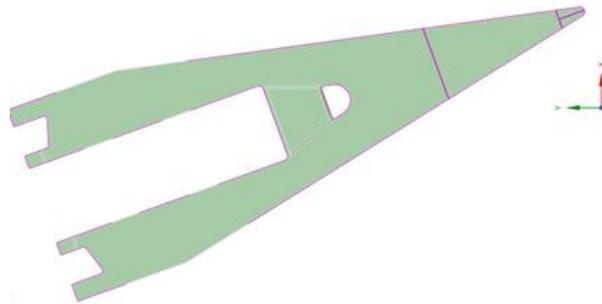


Рисунок 3.8 – Модель зуба

Для построения непрерывной сетки на границах соприкасающихся частей модели зуба дополнительно применялась операция обобществления, с помощью которой сетка строится таким образом, что узлы сеток из разных частей модели на границе соприкосновения являются общими. В ленточном интерфейсе программы SpaceClaim на вкладке Workbench использовалась функция Share. На этапе построения КЭ-сетки на общих границах соседних тел генератор сетки расположит узлы, общие для обоих контактирующих тел, что обеспечит правильный и плавный градиент поля напряжений и перемещений в объеме всей модели зуба.

Один из наиболее трудоемких и ответственных этапов подготовки модели – настройка свойств материалов для модели зуба. Поскольку предполагается работа зуба под нагрузками, вызывающими пластическую деформацию, то для описания поведения материала использовались экспериментальные данные – кривые деформирования. Из этих кривых высчитывался модуль упругости, определялись предел текучести и прочность при растяжении. Данные по свойствам материалов брались для состояния поставки, а также шести и десяти циклов ТЦО.

Экспериментальные кривые деформации не учитывают изменение площади поперечного сечения испытываемого образца. Для передачи данных в модель материала внутри ANSYS предварительные данные должны быть уточнены и переведены в истинные значения напряжений и деформации (см. п. 3.2.1).

Поведение материала в области нагрузок, превышающих предел текучести, отражает действие пластической и упругой деформаций. Для определения пластической относительной деформации воспользуемся следующим выражением:

$$\varepsilon_{plastic} = \varepsilon_{total} - \varepsilon_{elastic} ,$$

где $\varepsilon_{plastic}$ – истинное значение пластической деформации;

ε_{total} – суммарное истинное значение относительной деформации (ε_{true}).

В свою очередь, запишем выражение для истинного значения упругой деформации:

$$\varepsilon_{elastic} = \frac{\sigma_{true}}{E} ,$$

где E – модуль упругости.

Свойства материала вносятся в программу ANSYS с помощью меню Engineering Data под своим именем.

Для описания области пластической деформации в модели материала предусмотрена секция мультилинейной функции упрочнения (Multilinear Isotropic Hardening).

Для построения КЭ-модели зуба используется треугольная сетка. С помощью меню Method задаем для всех элементов модели способ построения сетки Tetrahedrons. В генераторе КЭ-сетки задается размер элементов сетки 15 мм.

В местах реализации максимальных напряжений и деформаций сетка задается в два раза гуще (8 мм). Построенная сетка содержит 74 964 элементов.

Необходимо отметить, что для сетки есть рекомендуемые характеристики «качества» элементов, показывающие, насколько сильно они искажены. Безразмерный коэффициент должен быть не меньше 0,2. Анализ выбранных размеров элементов сетки показывает, что подавляющее большинство элементов имеют коэффициент качества более 0,2. Увеличение числа элементов, которое повышает значение данного безразмерного коэффициента, приводит к росту ресурсоемкости модели и ужесточению требований к вычислительной мощности ПК. Иными словами, необходимо соблюдать баланс между качеством и вычислительной мощностью машины.

На рисунке 3.9, *а* показана КЭ-сетка зуба с увеличенной частотой разбиения в нижней части (для иллюстрации), т. е. в зоне максимальных деформаций. Далее задается граничное условие неподвижной фиксации Fixed Support (места крепления зуба). На рисунке 3.9, *б* зоны крепления выделены синим цветом.

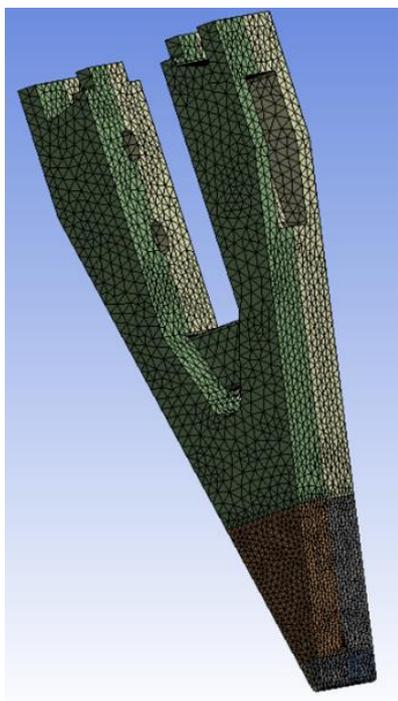
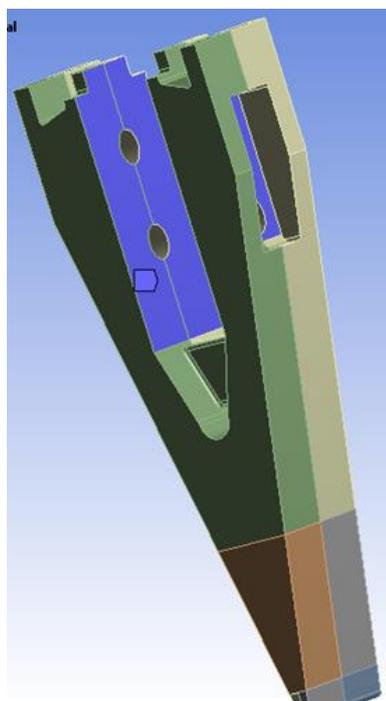
а)*б)*

Рисунок 3.9 – КЭ-сетка зуба и зона фиксации

Граничное условие нагружения задается с помощью опции Force. Вектор силы нагрузки повернут на 20° относительно горизонтальной оси X. Абсолютное значение силы нагрузки составляет 15 000 Н. Нагрузка приложена к одной из половинок нижней кромки зуба (рисунок 3.10).

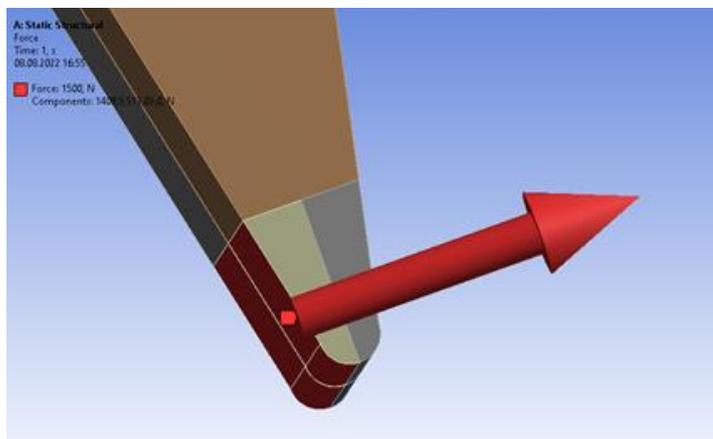


Рисунок 3.10 – Зона приложения нагрузки

Результаты расчетов в виде графиков выводятся в интересующих объемах в разделе Solution. Для расчета модели в области пластических деформаций с ростом величины нагрузки необходимо модифицировать настройки решателя: добавить промежуточные шаги по времени (Auto Time Stepping → On) и включить учет больших деформаций (Large Deflection).

Перед определением напряженно-деформированного состояния зуба ковша экскаватора был проведен расчет тестовой задачи, в качестве которой рассматривалась задача об изгибе балки с защемленным концом при приложении усилия к свободному концу. Тестовая задача решалась в упругой постановке.

Вторая задача, которая решалась расчетным путем, заключалась в определении усилия начала роста трещины в зубе ковша экскаватора. При моделировании поведения зуба с трещиной был использован модуль «Механика конструкций» программного пакета COMSOL Multiphysics® [114, 115]. Во всех расчетах длина трещины была взята 10,92 мм (см. рисунок 3.11, где выделен фрагмент зуба с трещиной). Длина трещины выбиралась из условия обеспечения достижения коэффициентом интенсивности напряжений своей предельной величины K_{Ic} .

Расчет напряжений в зубе ковша экскаватора проводился в статической постановке. Иными словами, длина трещины с ростом усилия не изменялась.

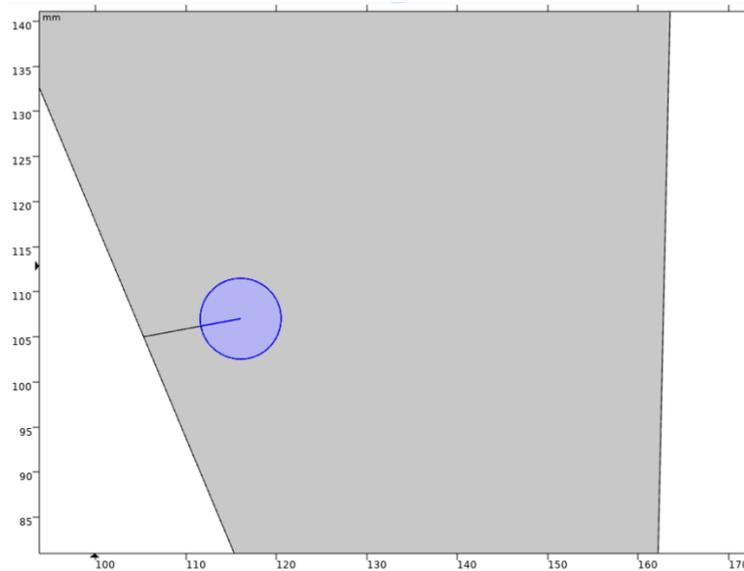


Рисунок 3.11 – Фрагмент зуба ковша с трещиной

3.3. Выводы по главе 3

1. В этой главе описаны методики и условия проведения испытаний, осуществленных в рамках данной диссертационной работы. Для каждого вида испытания приведено описание образцов и указано используемое оборудование. Представлены сведения о погрешностях измерения исследуемых величин.

2. Описана КЭ-модель зуба ковша экскаватора, с помощью которой проводится расчет напряженно-деформированного состояния данного рабочего органа ДСМ с целью оценки влияния уровня пластических характеристик исследуемых сталей 09Г2С и 30MnB5 на предельные нагрузки, в том числе и при наличии трещины.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты исследований и их обсуждение

4.1.1. Исследования среднего размера зерна, полученного при термоциклической обработке

Проведенная термоциклическая обработка сталей 09Г2С и 30MnB5 привела к изменению структуры, которое выразилось в получении более мелкого зерна. На рисунке 4.1 для иллюстрации показана микроструктура стали 09Г2С в состоянии поставки (*a*), после трех (*б*) и после шести (*в*) циклов ТЦО [22].

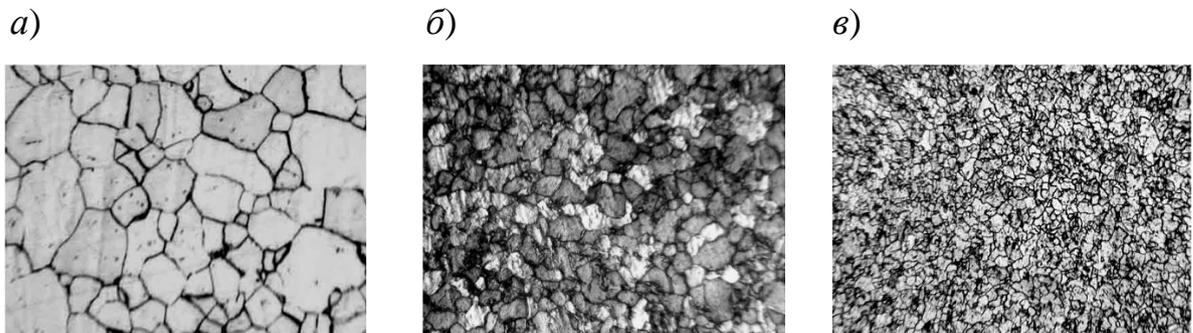


Рисунок 4.1 – Микроструктура стали 09Г2С, $\times 650$

Из рисунка 4.1 видно, что исходное крупнозернистая структура стали при проведении ТЦО переходит в мелкозернистую. Причем большее число циклов не только обеспечивает измельчение зерна, но и повышает однородность структуры. Аналогичная картина наблюдается и на образцах из стали 30MnB5.

В таблице 4.1 представлены данные по среднему размеру зерна сталей 09Г2С и 30MnB5 при различных количествах циклов ТЦО от 0 (исходное состояние) до 10 [24, 25].

Таблица 4.1 – Средний размер зерна d сталей 09Г2С и 30MnB5, мкм

Марка стали	Количество циклов N ТЦО							
	0	1	2	3	4	6	7	10
09Г2С	32	16	13	11	10	9	8	7,5
30MnB5	20	10	9	8	7	6	3	1,5

На рисунке 4.2 представлены зависимости среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки. Обработка данных проводилась в программе Sigma Plot v.12.5.

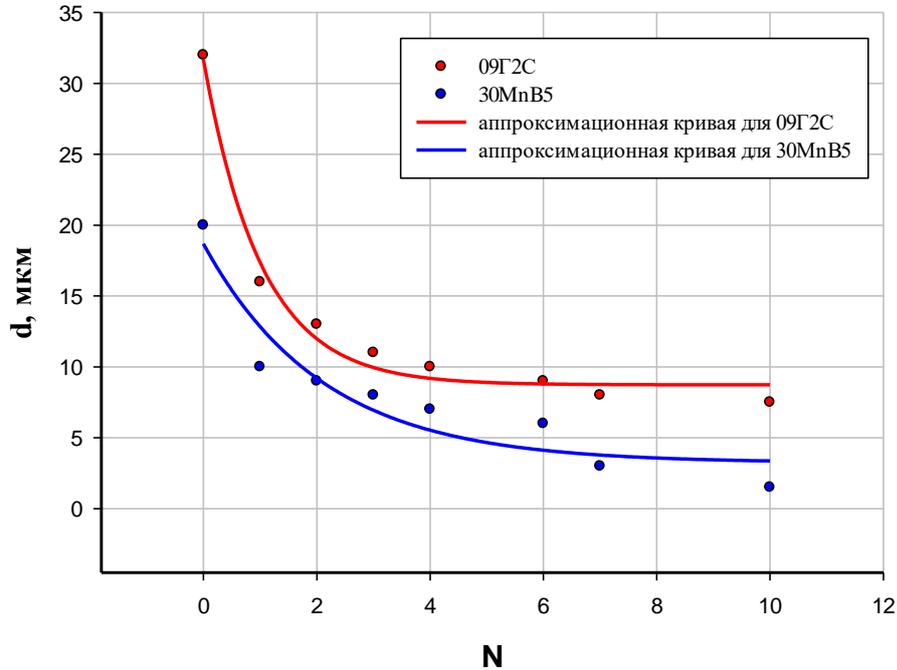


Рисунок 4.2 – Зависимости $d = f(N)$ для сталей 09Г2С и 30MnB5

Из данных таблицы 4.1 и зависимости $d = f(N)$ видно, что в исходном состоянии сталь 09Г2С имеет более крупное зерно, чем сталь 30MnB5. Кроме того, необходимо отметить, что сталь 09Г2С (начиная с $N = 4$) практически не изменяет размер зерна. Сталь 30MnB5, пусть и незначительно, продолжает менять размер зерна вплоть до $N = 10$.

Здесь и далее для каждой исследуемой зависимости осуществлялся подбор аппроксимационных соотношений с помощью программы Sigma Plot. При выборе общего вида той или иной зависимости предпочтение отдавалось зависимости с наибольшим значением коэффициента корреляции R , величина которого приведена для всех полученных соотношений.

Для исследуемых сталей зависимости $d = f(N)$ описываются следующим аппроксимационным соотношением [24, 25]:

$$d = d_0 + a^{-bN}.$$

Входящие в данное соотношение коэффициенты d_0 , a и b имеют следующие численные значения (причем размерность коэффициента a сложная, но размерность a^{-bN} [мкм]):

- сталь 09Г2С: $d_0 = 8,735$ мкм; $a = 22,965$ мкм; $b = 0,978$; $R = 0,99$;
- сталь 30MnB5: $d_0 = 3,237$ мкм; $a = 15,456$ мкм; $b = 0,476$; $R = 0,95$.

Результаты испытаний и анализ аппроксимационных соотношений говорят о том, что измельчение зерна в процессе ТЦО имеет некоторый предел. Для стали 09Г2С измельчение зерна заканчивается величиной порядка 9 мкм, которая достигается после шести циклов ТЦО. Для стали 30MnB5 минимальное значение среднего размера зерна находится в диапазоне $1,5 \div 3$ мкм, который выявляется после семи циклов ТЦО. При этом стоит указать, что фактические измерения среднего размера зерна показали двукратное уменьшение при переходе от шести циклов ТЦО к семи.

Факт наличия предельного минимального размера зерна при ТЦО был зафиксирован и другими исследователями, проводившими аналогичные работы. Отмечается, что величина минимального размера зерна зависит от марки стали и примененных режимов ТЦО. Например, для литых сталей 20Л и 20ФЛ при проведении четырех циклов с нагревом до температур $1100 \div 1170$ °С был получен минимальный размер зерна в интервале от 5,5 до 11 мкм [116].

Аналогичное явление было зафиксировано и в рамках других способов получения мелкозернистой структуры (например, при интенсивной пластической деформации кручением под давлением) [117].

4.1.2. Исследование физико-механических характеристик сталей при растяжении

Изменение величины среднего размера зерна, вызванное применением ТЦО, привело к изменению механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. На рисунке 4.3 приведены исходные диаграммы нагружения образцов при испытаниях на растяжение для исследуемых сталей в состоянии поставки. Аналогич-

ный характер поведения образцов в процессе нагружения зафиксирован для всех вариантов ТЦО (по числу циклов). Диаграммы различаются только в количественных значениях.

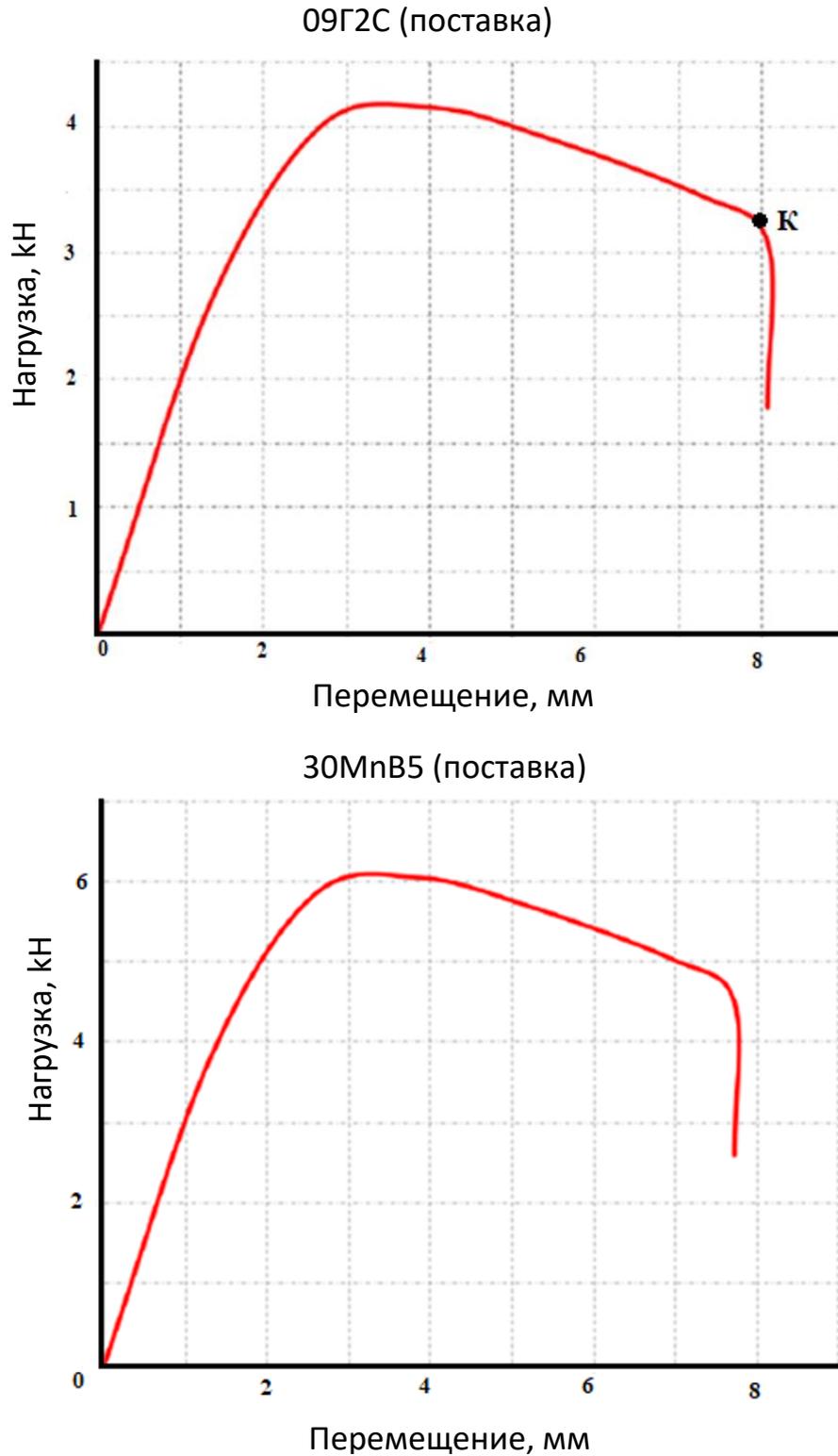


Рисунок 4.3 – Диаграммы нагружения при растяжении стальных образцов в состоянии поставки

В таблице 4.2 представлены значения пределов текучести и прочности при растяжении, полученные при испытаниях цилиндрических образцов в состоянии поставки и после воздействия различного числа N циклов ТЦО. Там же приведены значения относительного удлинения δ и относительного сужения ψ образцов.

Таблица 4.2 – Физико-механические характеристики сталей
09Г2С и 30MnB5 при растяжении

N	d , мкм	$\sigma_{\text{трас}}$, МПа	$\sigma_{b \text{ рас}}$, МПа	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	δ , %	ψ , %
Сталь 09Г2С						
0	32,0	357	446	2,01	16	24
1	16,0	371	468	2,01	15	23
2	13,0	385	482	2,00	14	22
3	11,0	392	491	1,99	14	21
4	10,0	404	499	2,00	13	21
5	9,5*	405	501	2,01	13	21
6	9,0	405	502	2,01	12	20
7	8,0	409	503	2,01	12	19
8	7,8*	409	505	2,01	11	17
9	7,6*	410	506	2,01	10	17
10	7,5	410	507	2,01	10	16
Сталь 30MnB5						
0	20,0	400	650	2,45	32	46
1	10,0	410	750	2,41	30	47
2	9,0	415	760	2,37	29	47
3	8,0	420	785	2,27	27	49
4	7,0	480	850	2,39	27	47
5	6,5*	490	905	2,29	26	49
6	6,0	500	950	2,13	25	52
7	3,0	600	998	2,22	23	50
8	2,5*	608	1523	2,36	22	48
9	2,0*	609	1687	2,41	20	47
10	1,5	610	1700	2,39	19	47

Примечание: * – расчетные значения среднего размера зерна (см. п. 4.1.1).

Модуль упругости E для обеих исследуемых сталей является достаточно стабильной величиной, практически не зависящей от количества циклов ТЦО и изменяющейся в узком диапазоне. Среднее значение модуля упругости для ста-

ли 09Г2С составляет $2,01 \cdot 10^5$ МПа (коэффициент вариации 0,3 %), а для стали 30MnB5 – $2,34 \cdot 10^5$ МПа (коэффициент вариации 4,1 %).

На рисунках 4.4–4.7 приведены зависимости $\sigma_{\text{трас}} = f(N)$, $\sigma_{b \text{ рас}} = f(N)$, $\sigma_{\text{трас.}} = f(d^{-0,5})$ и $\sigma_{b \text{ рас.}} = f(d^{-0,5})$. Отметим следующую особенность представленных зависимостей. На зависимостях $\sigma_{\text{трас}} = f(N)$ и $\sigma_{b \text{ рас}} = f(N)$ для стали 30MnB5 четко выделяются два участка – до шести циклов ТЦО и после. Для стали 09Г2С такого разделения нет. По всей видимости, подобное разделение связано с поведением исследуемых сталей при термоциклировании. Об этом говорят зависимости среднего размера зерна от числа циклов N (см. рисунок 4.2). При подборе аппроксимационных зависимостей в расчет взяты все результаты по вариации количества циклов ТЦО, т. е. от 0 (состояние поставки) до 10 циклов с указанием коэффициента корреляции R_{10} . Для сравнения указывается значение коэффициента вариации R_6 для варианта $N = (0 \div 6)$ без приведения коэффициентов аппроксимационной зависимости.

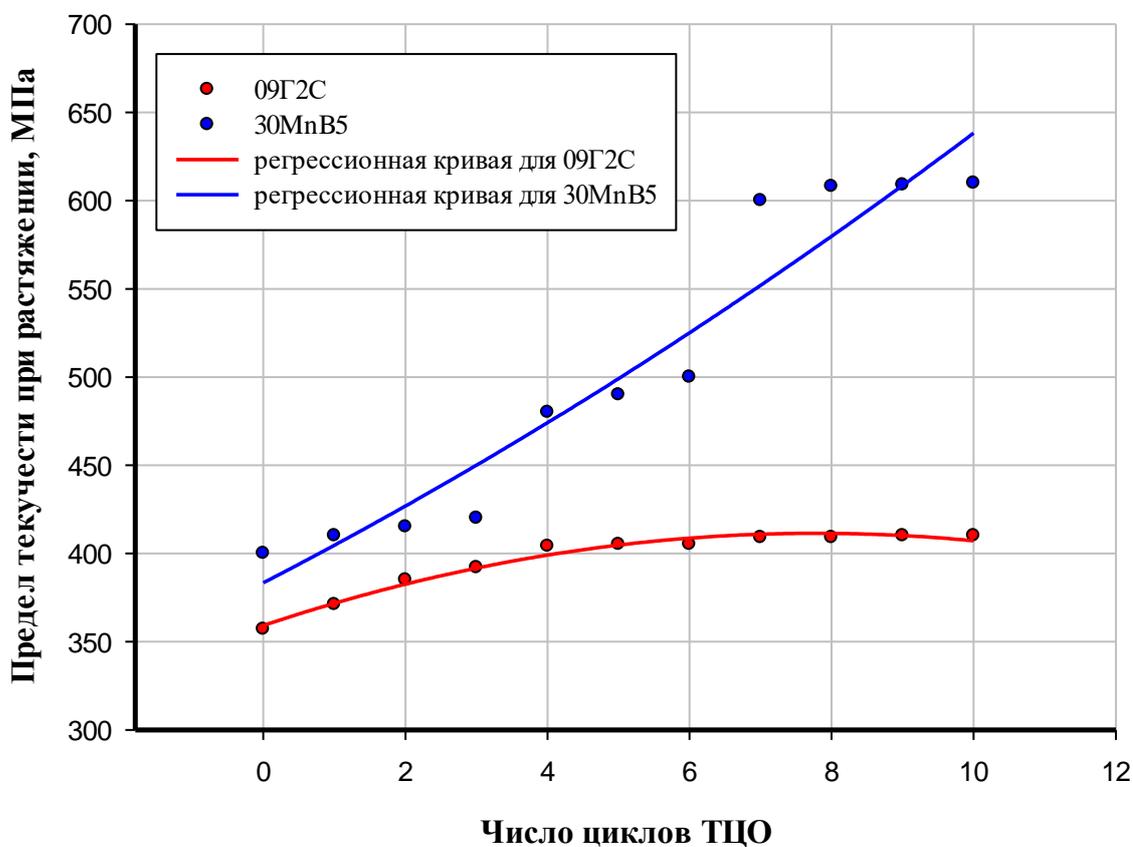


Рисунок 4.4 – Зависимость $\sigma_{\text{трас}} = f(N)$

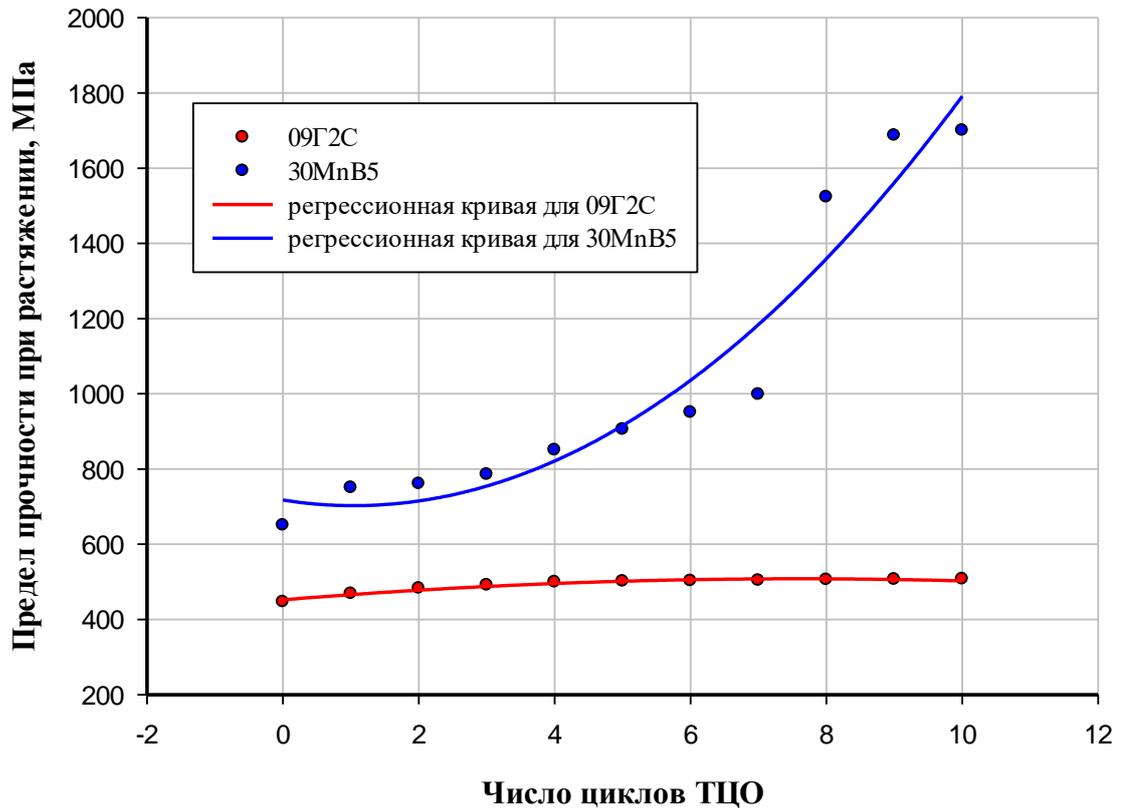


Рисунок 4.5 – Зависимость $\sigma_{b \text{ рас}} = f(N)$

Зависимость предела текучести материала $\sigma_{\text{трас}}$ (в данном случае речь идет об условном пределе текучести $\sigma_{0,2}$) от количества циклов N имеет квадратичный вид:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2} \cdot N + b_{0,2} \cdot N^2.$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

➤ сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0 = 359,2$ МПа; $a_{0,2} = 13,42$ МПа; $b_{0,2} = -0,86$ МПа; $R_{10} = 0,99$ ($R_6 = 0,99$);

➤ сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 383,3$ МПа; $a_{0,2} = 20,83$ МПа; $b_{0,2} = 0,47$ МПа; $R_{10} = 0,96$ ($R_6 = 0,95$).

Как и для предела текучести, зависимость предела прочности материала $\sigma_{b \text{ рас}}$ от количества циклов N имеет квадратичный вид:

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b \cdot N + b_b \cdot N^2.$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

- сталь 09Г2С: $\sigma_b^0 = 452,2$ МПа; $a_b = 14,71$ МПа; $b_b = -0,97$ МПа; $R_{10} = 0,98$ ($R_6 = 0,99$);
- сталь 30MnB5: $\sigma_b^0 = 717,3$ МПа; $a_b = -28,29$ МПа; $b_b = 13,57$ МПа; $R_{10} = 0,97$ ($R_6 = 0,98$).

На рисунке 4.6 приведены зависимости Холла – Петча для пределов текучести сталей 09Г2С и 30MnB5.

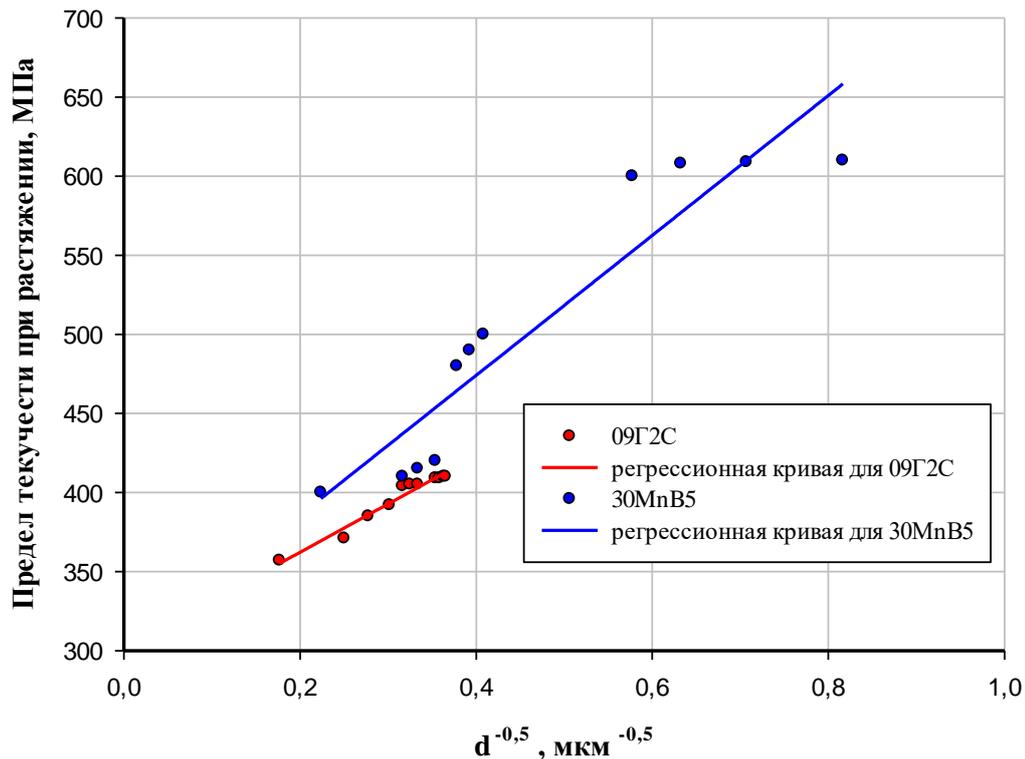


Рисунок 4.6 – Зависимость $\sigma_{\text{трас.}} = f(d^{-0,5})$

Зависимость Холла – Петча связывает значение предела текучести материала $\sigma_{\text{трас}}$ (в данном случае имеется в виду условный предел текучести $\sigma_{0,2}$) со средним размером зерна $d^{-0,5}$ и имеет линейный характер [54]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2} \cdot d^{-0,5}.$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

- сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0 = 301,1$ МПа; $a_{0,2} = 305,68$ МПа · мкм^{0,5}; $R_{10} = 0,98$ ($R_6 = 0,97$);
- сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 297,2$ МПа; $a_{0,2} = 442,34$ МПа · мкм^{0,5}; $R_{10} = 0,94$ ($R_6 = 0,84$).

Близость аппроксимационных зависимостей к линейной функции (высокие значения коэффициента корреляции) говорит о том, что данная закономерность для сталей 09Г2С и 30МнВ5 работает.

Закон Холла – Петча соблюдается для твердости материала, а также для напряжений, превышающих предел текучести – например, для предела прочности σ_b [54]. На рисунке 4.7 приведена зависимость $\sigma_{b \text{ рас}} = f(d^{-0,5})$, иллюстрирующая данное утверждение.

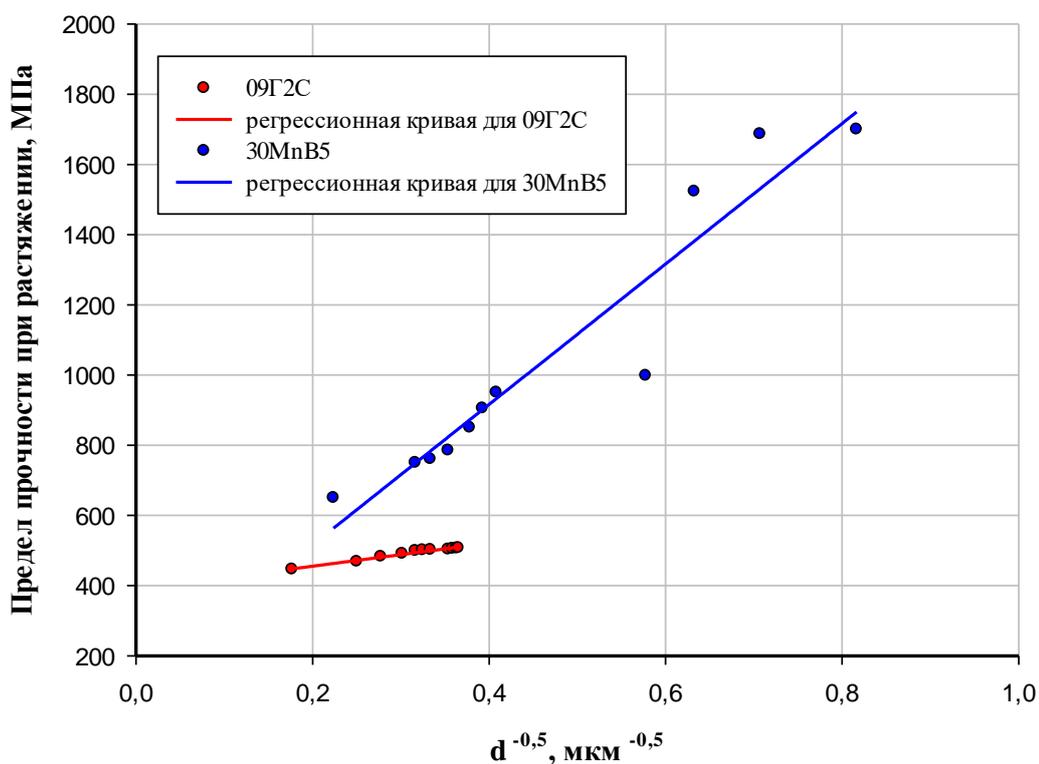


Рисунок 4.7 – Зависимость $\sigma_{b \text{ рас}} = f(d^{-0,5})$

Уравнение Холла – Петча для предела прочности записывается в виде, аналогичном случаю предела текучести:

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b \cdot d^{-0,5}.$$

Коэффициенты, входящие в соотношение $\sigma_{b \text{ рас}} = f(d^{-0,5})$, имеют следующие численные значения:

➤ сталь 09Г2С: $\sigma_b^0 = 389,3$ МПа; $a_b = 329,77$ МПа · мкм 0,5 ; $R_{10} = 0,98$ ($R_6 = 0,995$);

➤ сталь 30MnB5: $\sigma_b^0 = 115,7$ МПа; $a_b = 2001,49$ МПа · мкм^{0,5}; $R_{10} = 0,96$ ($R_6 = 0,95$).

Еще один показатель, характеризующий механические свойства данных сталей, – истинный предел прочности $\sigma_{b \text{ ист}}$, который связан с наличием локальной пластической деформации образцов за счет образования шейки (см. рисунок 3.2). Величина данного показателя определяется по соотношению [105]:

$$\sigma_{b \text{ ист}} = \frac{P_K}{F_0(1 - \psi)},$$

где P_K – нагрузка на образец в момент начала лавинообразного образования шейки (см. рисунок 4.3, точка К), F_0 – начальная площадь образца, а произведение $F_0(1 - \psi)$ представляет собой конечную площадь F_K .

В таблице 4.3 приведены величины нагрузки P_K , определенных по диаграммам нагружения образцов сталей, и результаты расчетов конечной площади F_K и истинного предела прочности при растяжении $\sigma_{b \text{ ист}}$ для сталей 09Г2С и 30MnB5. Для сравнения приведены значения $\sigma_{b \text{ рас}}$, определенных по максимальному усилию (см. таблицу 4.2). Значения относительного сужения образцов ψ , используемых в расчетах, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.3 – Истинный предел прочности $\sigma_{b \text{ ист}}$ сталей 09Г2С и 30MnB5

N	Сталь 09Г2С				Сталь 30MnB5			
	P_K , кН	F_K , мм ²	$\sigma_{b \text{ рас}}$, МПа	$\sigma_{b \text{ ист}}$, МПа	P_K , кН	F_K , мм ²	$\sigma_{b \text{ рас}}$, МПа	$\sigma_{b \text{ ист}}$, МПа
0	3,20	5,58	446	573	4,85	5,02	650	966
1	3,45	5,48	468	630	5,50	4,92	750	1118
2	3,60	5,48	482	659	5,55	4,83	760	1149
3	3,65	5,27	491	692	5,80	4,74	785	1224
4	3,70	5,48	499	675	6,20	4,92	850	1260
5	3,70	5,27	501	702	6,80	4,74	905	1435
6	3,70	4,86	502	761	7,00	4,37	950	1602
7	3,75	5,07	503	739	7,30	4,55	998	1604
8	3,75	5,38	505	697	11,20	4,83	1523	2318
9	3,75	5,48	506	684	12,30	4,92	1687	2500
10	3,75	5,48	507	684	12,50	4,92	1700	2540

Как видно из таблицы 4.3, для всех вариантов термоциклической обработки относительный предел прочности $\sigma_{b \text{ рас}}$ при растяжении образца оказывается меньше его истинной величины $\sigma_{b \text{ ист}}$.

Зависимость $\sigma_{b \text{ ист}} = f(N)$ приведена на рисунке 4.8.

Так же, как и для предела текучести, зависимость предела прочности материала $\sigma_{b \text{ рас}}$ от количества циклов N имеет квадратичный вид:

$$\sigma_{b \text{ ист}} = \sigma_{b \text{ ист}}^0 + a_{b \text{ ист}} \cdot N + b_{b \text{ ист}} \cdot N^2.$$

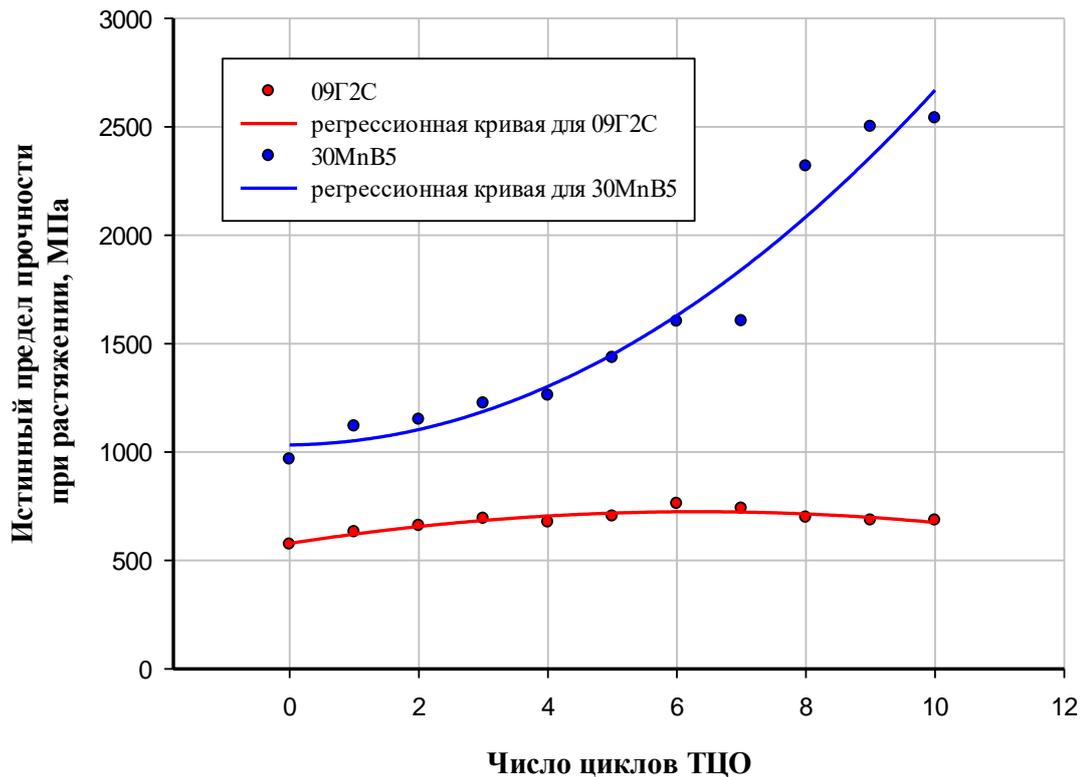


Рисунок 4.8 – Зависимость $\sigma_{b \text{ ист}} = f(N)$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

➤ сталь 09Г2С: $\sigma_{b \text{ ист}}^0 = 578,0$ МПа; $a_{b \text{ ист}} = 46,36$ МПа; $b_{b \text{ ист}} = -3,67$ МПа;
 $R_{10} = 0,93$ ($R_6 = 0,95$);

➤ сталь 30МнВ5: $\sigma_{b \text{ ист}}^0 = 1032,5$ МПа; $a_{b \text{ ист}} = 3,39$ МПа; $b_{b \text{ ист}} = 16,03$ МПа;
 $R_{10} = 0,98$ ($R_6 = 0,98$).

Проведенный корреляционный анализ говорит о том, что все полученные аппроксимационные зависимости имеют высокие значения коэффициентов кор-

реляции. При этом существенной разницы между вариантами использования данных для $N = 0 \div 10$ и $N = 0 \div 6$ не обнаружено. Это позволяет использовать все экспериментальные данные в одной генеральной совокупности.

4.1.3. Исследование физико-механических характеристик сталей при сжатии

Диаграммы нагружения образцов из сталей 09Г2С и 30MnB5 для трех циклов ТЦО (для иллюстрации) приведены на рисунке 4.9.

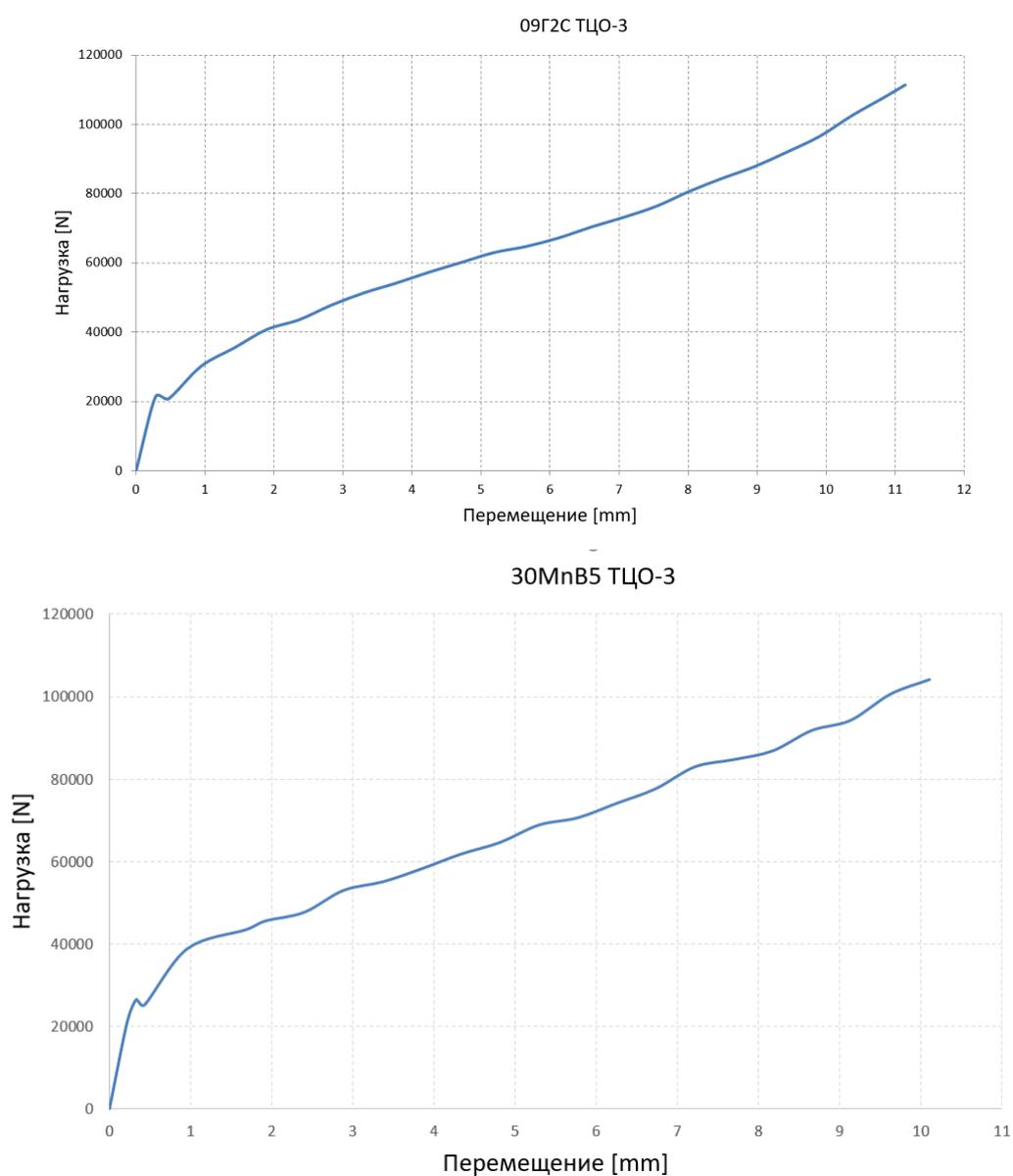


Рисунок 4.9 – Диаграммы нагружения стальных образцов при сжатии

Как видно из рисунка, диаграммы нагружения образцов при сжатии для обеих сталей имеют идентичный вид, который наблюдается как в состоянии поставки материала, так и после различного числа циклов ТЦО от 1 до 10. Характерная особенность диаграмм нагружения – наличие небольшого зуба текучести. При нагружении образцы не были доведены до разрушения. Нагрузка снималась при достижении усадки образца в районе $9 \div 11$ мм, что соответствовало деформации сжатия порядка 50 %.

Внешний вид образцов на сжатие до нагружения и после испытаний представлен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Внешний вид стальных образцов

Условный предел текучести $\sigma_{0,2сж}$ определялся по диаграммам нагружения согласно рекомендациям ГОСТ 25.503–97 [106]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Условный предел текучести $\sigma_{0,2сж}$ стальных образцов при сжатии, МПа

Сталь	Количество циклов N ТЦО										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
09Г2С	265	268	273	281	292	305	326	337	345	347	349
30MnB5	330	333	340	349	363	379	406	419	429	432	434

В графическом виде зависимость $\sigma_{0,2сж} = f(N)$ приведена на рисунке 4.11. Наиболее близко к экспериментальным точкам расположена четырехпараметрическая сигмоидальная зависимость, которая описывается соотношением

$$\sigma_{0,2сж} = \sigma_{0,2сж}^0 + \frac{a}{1 + e^{-\frac{N-N_0}{b}}}$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

➤ сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2сж}^0 = 264,61$ МПа; $a = 86,65$ МПа; $b = 1,26$; $N_0 = 4,991$; $R_{10} = 0,999$;

➤ сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2сж}^0 = 329,52$ МПа; $a = 107,26$ МПа; $b = 1,25$; $N_0 = 5,006$; $R_{10} = 0,998$.

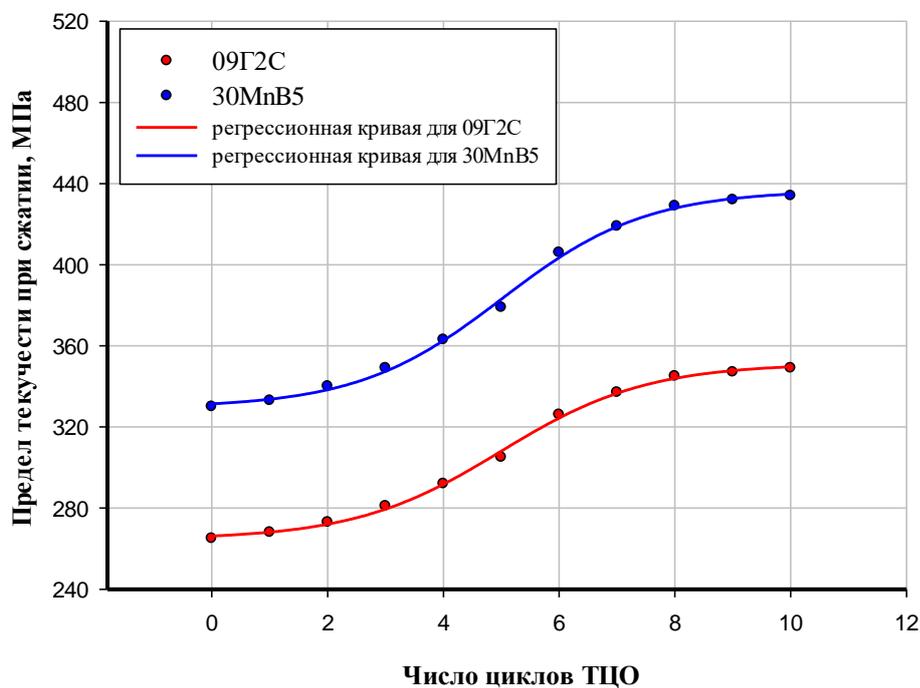


Рисунок 4.11 – Зависимость $\sigma_{0,2сж} = f(N)$

Модуль упругости при сжатии сталей не определялся. Учитывая, что стали относятся к классу изотропных материалов, можно при необходимости ориентироваться на данные результатов испытаний на растяжение (см. п. 4.1.2).

4.1.4. Исследование механических характеристик сталей при изгибе

На рисунке 4.12 приведены диаграммы нагружения при изгибе образцов из сталей 09Г2С и 30MnB5 для трех циклов ТЦО. Видно, что оба исследуемых материала имеют одинаковые диаграммы нагружения. Отмечается значительный уровень пластичности при некотором упрочнении материала после прохождения упру-

гого участка. Для состояния поставки и различного числа циклов N характер диаграмм нагружения сохраняется. Изменения касаются только численных значений.

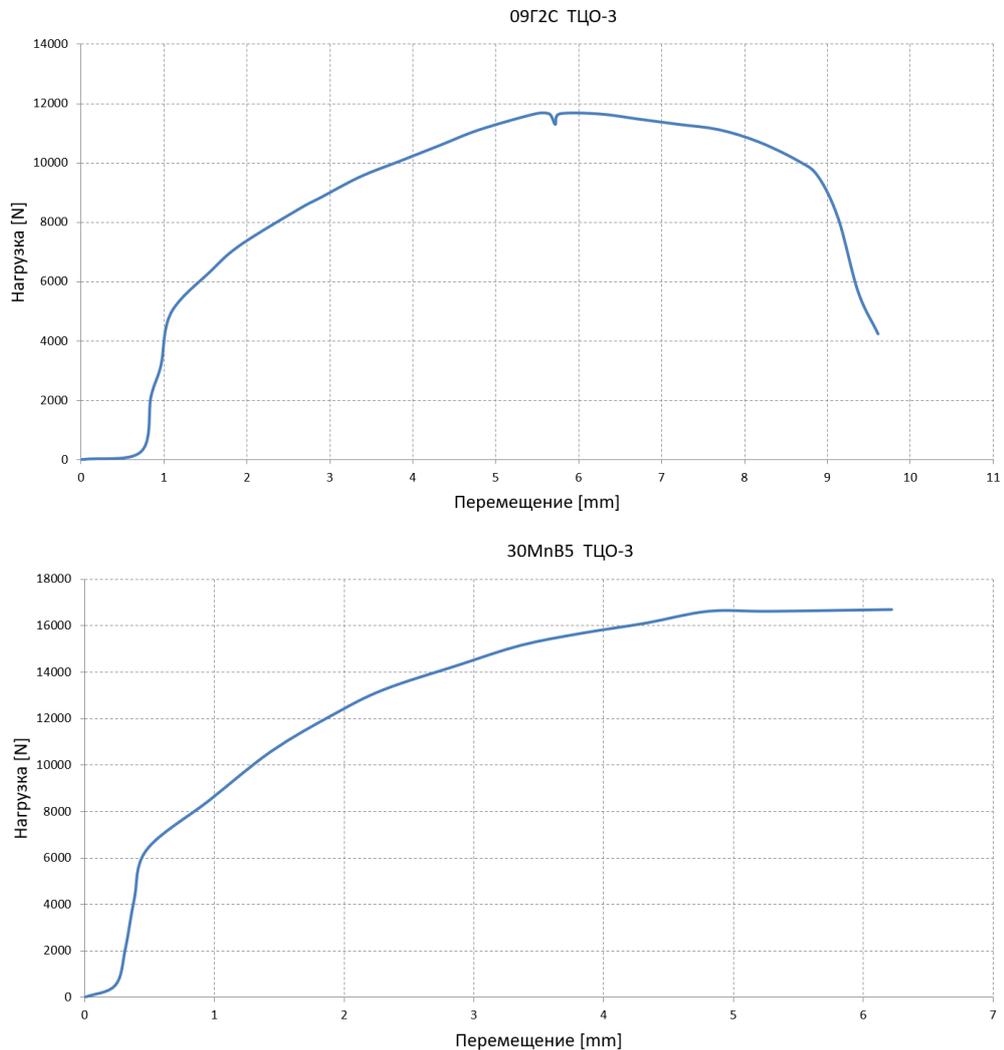


Рисунок 4.12 – Диаграммы нагружения при изгибе образцов

Наличие существенной пластичности привело к необходимости останавливать нагружение, не доводя образец до разрушения (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Внешний вид образца после испытаний на изгиб

Значения максимального изгибного напряжения (прочность при изгибе образца), определенная по величине максимального усилия, приведена в таблице 4.5 и в графическом виде – на рисунке 4.14.

Таблица 4.5 – Прочность при изгибе образца $\sigma_{\max и}$, МПа

Сталь	Количество циклов N ТЦО										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
09Г2С	841	850	866	892	925	967	1034	1068	1093	1102	1106
30MnB5	1203	1216	1239	1276	1324	1384	1480	1528	1564	1576	1582

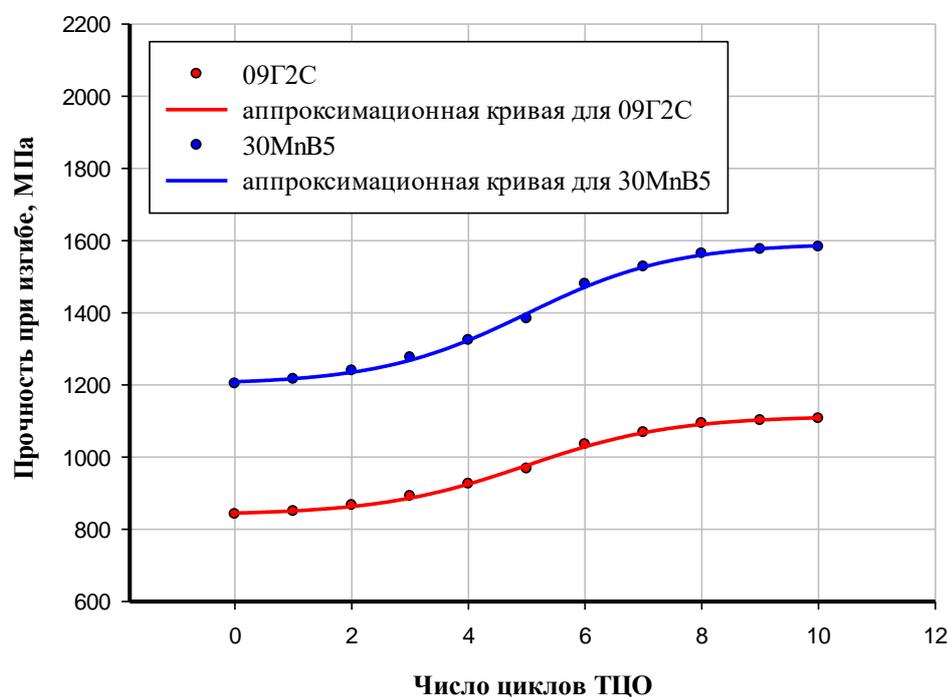


Рисунок 4.14 – Прочность при изгибе образца $\sigma_{\max и}$

Видно, что во всем диапазоне изменения количества циклов ТЦО прочность при изгибе $\sigma_{\max и}$ образцов из стали 30MnB5 превышает аналогичный показатель для стали 09Г2С.

Как и в случае сжатия, ближе всего к экспериментальным точкам расположена четырехпараметрическая сигмоидальная зависимость, которая описывается соотношением

$$\sigma_{\max и} = \sigma_{\max и}^0 + \frac{a}{1 + e^{-\frac{N-N_0}{b}}}$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

➤ сталь 09Г2С: $\sigma_{\max и}^0 = 839,71$ МПа; $a = 274,15$ МПа; $b = 1,26$; $N_0 = 4,999$; $R_{10} = 0,998$;

➤ сталь 30MnB5: $\sigma_{\max и}^0 = 1201,14$ МПа; $a = 392,24$ МПа; $b = 1,26$; $N_0 = 4,995$; $R_{10} = 0,999$.

4.1.5. Результаты циклических испытаний

В таблице 4.6 приведены результаты испытаний образцов сталей на циклическую прочность для трех значений частоты нагружения [25].

Таблица 4.6 – Результаты циклических испытаний

Сталь	ω , Гц	$\text{tg } \alpha_W$	σ_{-1} , МПа	σ_b , МПа	χ
09Г2С	2,0	0,2655	115	490	0,234
	2,7	0,3293	105	490	0,214
	100	0,1337	310	490	0,632
30MnB5	2,0	0,0877	540	950	0,568
	2,7	0,1311	480	950	0,505
	46,7	0,1600	250	950	0,263

Поскольку образцы были вырезаны из трубной заготовки, то возникла необходимость определения величины предела прочности сталей при растяжении. Эти испытания были проведены, их результаты представлены в таблице 4.6.

Из данных таблицы 4.6 видно, что сталь марки 09Г2С показывает повышение циклической прочности с увеличением частоты приложения нагрузки практически в три раза, а сталь 30MnB5 – наоборот, более чем двукратное снижение. Таким образом, при выборе материала для рабочих органов дорожно-строительных машин, работающих в одинаковых (похожих) условиях эксплуатации при низких частотах нагружения, целесообразнее использовать борсодержащую сталь 30MnB5 вместо низколегированной стали 09Г2С.

Термоциклической обработки данных образцов не проводилось, поэтому была сделана расчетная оценка влияния количества циклов N ТЦО на величину предела выносливости. Для расчетов было использовано следующее соотношение [91]:

$$\sigma_{-1} = K_{\delta}^{0,5} \cdot \sigma_b.$$

Здесь $K_{\delta} = (1 - \delta)^{1/\delta}$ – коэффициент пластичности (см. п. 2.2.3).

Результаты расчетов приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Предел выносливости σ_{-1} сталей 09Г2С и 30MnB5, МПа

Сталь	N										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
09Г2С	150	158	164	167	171	172	173	173	175	176	177
30MnB5	195	228	233	245	265	284	301	320	492	553	561

В графическом виде зависимость предела выносливости от числа циклов ТЦО $\sigma_{-1} = f(N)$ представлена на рисунке 4.15.

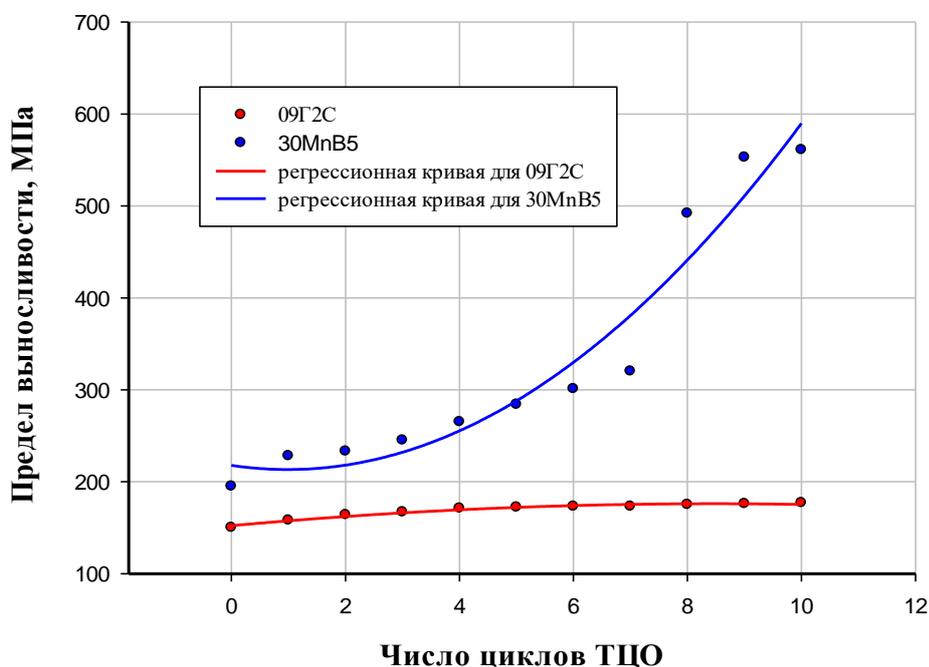


Рисунок 4.15 – Зависимость $\sigma_{-1} = f(N)$

По характеру кривых поведение предела выносливости естественно совпадает с пределом прочности на растяжение. Относительно расхождения величин, приведенных в таблицах 4.6 и 4.7, можно предположить, что, помимо частоты

нагружения, на величину предела выносливости, влияет и вид нагружения – кручение с изгибом и растяжение-сжатие.

Зависимость предела выносливости материала σ_{-1} от количества циклов N имеет квадратичный вид:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^0 + a_{-1} \cdot N + b_{-1} \cdot N^2.$$

Коэффициенты, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения:

- сталь 09Г2С: $\sigma_{-1}^0 = 152,2$ МПа; $a_{-1} = 5,64$ МПа; $b_{-1} = -0,33$ МПа; $R_{10} = 0,98$;
- сталь 30MnB5: $\sigma_{-1}^0 = 217,7$ МПа; $a_{-1} = -9,14$ МПа; $b_b = 4,63$ МПа; $R_{10} = 0,96$.

4.1.6. Микротвердость сварных соединений

На рисунке 4.16 показаны точки измерения микротвердости в сварном шве с привязкой к его отдельным зонам (основной металл, зона термического влияния (ЗТВ) и собственно сварной шов).

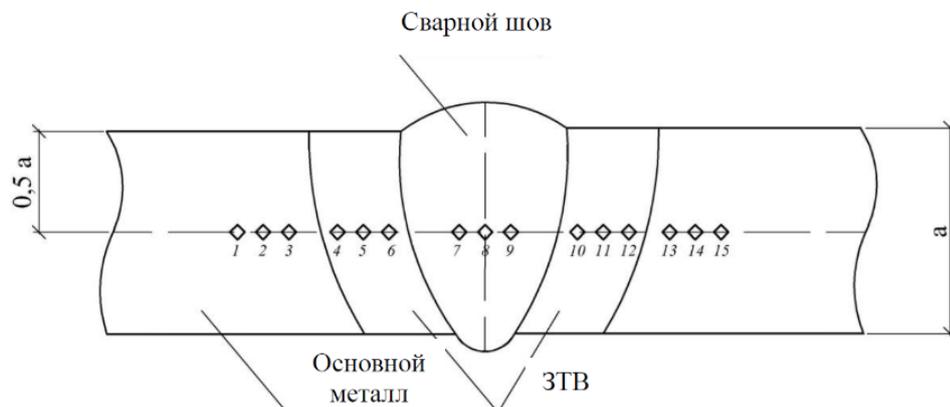


Рисунок 4.16 – Точки измерения микротвердости

Распределение микротвердости по точкам измерения для образца из стали 30MnB5 (толщина 3 мм) изображено на рисунке 4.17 [25]. Там же точками с привязкой к упомянутым выше зонам сварного шва показаны значения микротвердости для образца из стали 09Г2С [118].

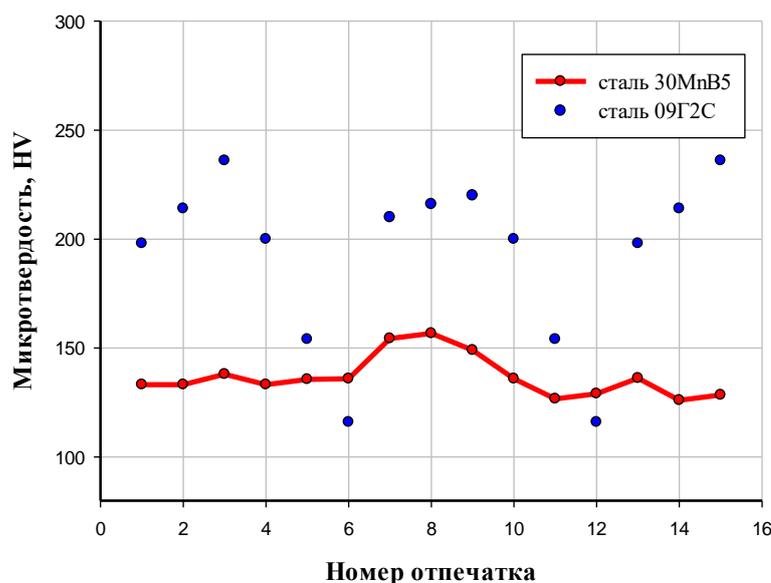


Рисунок 4.17 – Микротвердость в различных зонах сварного соединения

Видно, что распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Даже в зоне сварного шва превышение над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – порядка 20÷30 единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше по сравнению со сталью 30MnB5. Это говорит о том, что сталь 09Г2С, имея высокий уровень микротвердости, оказывается более хрупкой (относительно стали 30MnB5). Это означает наличие низкой пластичности и повышенной чувствительности к концентраторам напряжений.

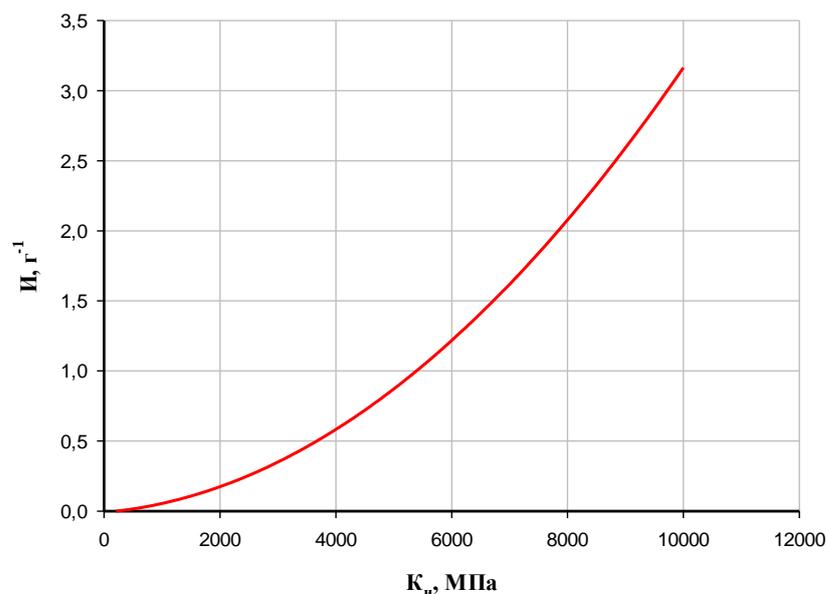
4.1.7. Оценка износостойкости сталей

Для оценки износостойкости сталей служил критерий $K_{и}$ [92]:

$$K_{и} = \sigma_b \cdot \psi + HV.$$

Здесь используются следующие единицы измерения: предел прочности σ_b – мегапаскали (МПа), относительное сужение при растяжении ψ – доли (%/100), твердость по Виккерсу – МПа.

В работе [92] связь износостойкости И с критерием $K_{и}$ представлена в графическом виде и была получена при испытании нескольких марок износостойких сталей. Данная зависимость приведена на рисунке 4.18.

Рисунок 4.18 – Связь износостойкости И с критерием K_n

Зависимость износостойкости сталей И от величины критерия K_n описывается полиномом второй степени:

$$И = -0,0084 + 3,49 \cdot 10^{-5} \cdot K_n + 2,82 \cdot 10^{-8} \cdot K_n^2. \quad (4.1)$$

Коэффициент корреляции данного соотношения $R = 0,99$.

В таблице 4.8 приведены исходные данные для определения параметра K_n и результаты оценки износостойкости $И = f(K_n)$ по соотношению (4.1). В целях сравнения двух сталей по данному показателю введены обозначения износостойкости по маркам стали $И_{09Г2С}$ и $И_{30MnB5}$. Относительная износостойкость $\varepsilon = И_{30MnB5} / И_{09Г2С}$ также приведена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Износостойкость сталей 09Г2С и 30MnB5

N	Сталь 09Г2С					Сталь 30MnB5					ε
	σ_b , МПа	ψ	HV, МПа	K_n , МПа	$И_{09Г2С}$, Г ⁻¹	σ_b , МПа	ψ	HV, МПа	K_n , МПа	$И_{30MnB5}$, Г ⁻¹	
0	446	0,24	4200	4307	0,66	650	0,46	4920	5219	0,94	1,4
1	468	0,23	4210	4318	0,67	750	0,47	4940	5293	0,97	1,4
2	482	0,22	4230	4336	0,67	760	0,47	4960	5317	0,98	1,4
3	491	0,21	4280	4383	0,69	785	0,49	4970	5355	0,99	1,4
4	499	0,21	4320	4425	0,70	850	0,47	4990	5390	1,00	1,4
5	501	0,21	4350	4455	0,71	905	0,49	5070	5513	1,04	1,5
6	502	0,20	4360	4460	0,71	950	0,52	5120	5614	1,08	1,5
7	503	0,19	4420	4516	0,72	998	0,50	5140	5639	1,09	1,5
8	505	0,17	4440	4526	0,73	1523	0,48	5170	5901	1,18	1,6
9	506	0,17	4460	4546	0,73	1687	0,47	5200	5993	1,21	1,7
10	507	0,16	4480	4561	0,74	1700	0,47	5230	6029	1,23	1,7

Как видно из результатов, представленных в таблице 4.8, износостойкость стали 30MnB5 примерно в 1,5 раза выше износостойкости стали 09Г2С. Причем с увеличением числа циклов ТЦО растет и относительная износостойкость ε .

На рисунке 4.19 приведена зависимость износостойкости сталей 09Г2С и 30MnB5 от числа циклов N термоциклической обработки.

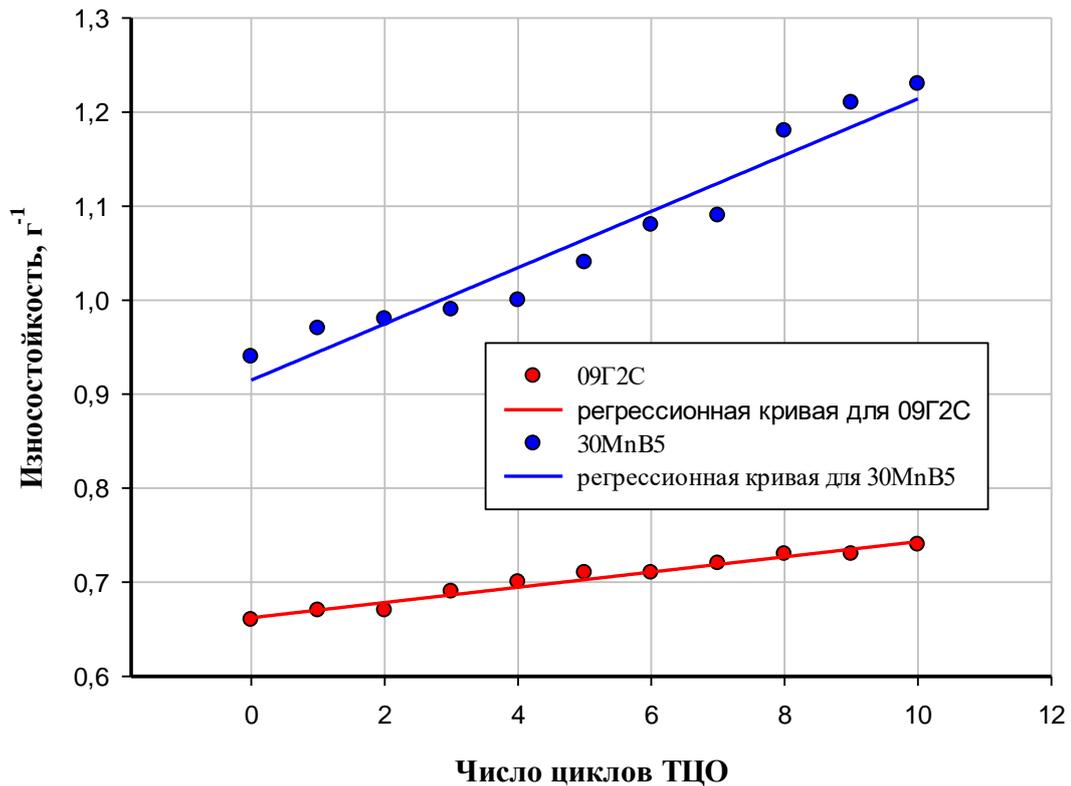


Рисунок 4.19 – Зависимость $I = f(N)$

Следует отметить, что зависимость $I = f(K_H)$, представленная на рисунке 4.18, была получена при исследовании большого числа сталей, имеющих более высокие характеристики прочности и твердости, чем исследуемые в данной работе материалы. Поэтому уровень износостойкости сталей 09Г2С и 30MnB5 можно считать невысоким. Тем не менее детали машин, выполненные из этих сталей, получили достаточно широкое распространение и успешно эксплуатируются в различных отраслях народного хозяйства. В некоторых случаях, когда параметр износостойкости является определяющим вследствие непосредственного контакта инструмента со средой, прибегают к специальным мерам для его повышения: термической обработке, наплавке износостойкого материала и т. д. [119–122].

Для исследуемых сталей зависимости $I = f(N)$ описываются следующим аппроксимационным соотношением [24, 25]:

$$I = I_0 + a \cdot N.$$

Входящие в данное соотношение коэффициенты d_0 , a и b имеют следующие численные значения:

- сталь 09Г2С: $I_0 = 0,6623 \text{ г}^{-1}$; $a = 0,0081 \text{ г}^{-1}$; $R = 0,985$;
- сталь 30MnB5: $I_0 = 0,915 \text{ мкм}$; $a = 0,0299 \text{ г}^{-1}$; $b = 0,476$; $R = 0,97$.

4.1.8. Оценка трещиностойкости сталей

Для оценки величины критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} было использовано соотношение [89]

$$K_{Ic} = 0,643 \cdot \sigma_T \frac{\frac{\sigma_b}{\sigma_T} - 1}{\sqrt{1 - \nu^2}},$$

где $\nu = 0,3$ – коэффициент Пуассона стали.

В таблице 4.9 приведены исходные данные для расчета K_{Ic} и полученные значения этого коэффициента. При этом $\sigma_T = \sigma_{T \text{ рас}}$ и $\sigma_b = \sigma_{b \text{ рас}}$.

Таблица 4.9 – Трещиностойкость сталей 09Г2С и 30MnB5

N	Сталь 09Г2С			Сталь 30MnB5		
	$\sigma_{T \text{ рас}}$, МПа	$\sigma_{b \text{ рас}}$, МПа	K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}	$\sigma_{T \text{ рас}}$, МПа	$\sigma_{b \text{ рас}}$, МПа	K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}
0	357	446	60,0	400	650	168,5
1	371	468	65,4	410	750	229,2
2	385	482	65,4	415	760	232,5
3	392	491	66,7	420	785	246,0
4	404	499	64,0	480	850	249,4
5	405	501	64,7	490	905	279,7
6	405	502	65,4	500	950	303,3
7	409	503	63,4	600	998	268,3
8	409	505	64,7	608	1523	616,7
9	410	506	64,7	609	1687	726,6
10	410	507	65,4	610	1700	734,7

Из таблицы видно, что измельчение зерна, инициированное ТЦО, приводит не только к улучшению механических характеристик, но и к увеличению комплексного показателя механических свойств материалов, каковым является вязкость разрушения (коэффициент интенсивности напряжений). Это отмечается и в монографии [116].

4.2. Расчетная оценка работоспособности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А

4.2.1. Результаты расчета тестовой задачи изгиба балки

Основная цель расчета тестовой задачи с использованием любой программы, в том числе и ANSYS, заключается в оценке работоспособности созданной расчетной модели исследуемого объекта. В данном случае в качестве тестовой задачи рассмотрена консольная балка с защемленным концом и под действием поперечной нагрузки F , приложенной к свободному концу (рисунок 4.20).

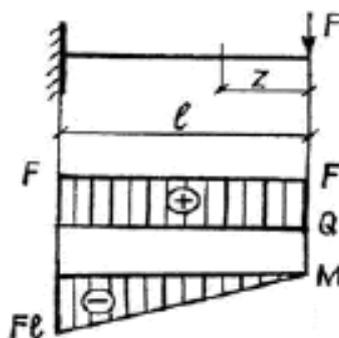


Рисунок 4.20 – Схема нагружения балки

Размеры балки: длина $l = 900$ мм, ширина $b = 10$ мм, высота $h = 320$ мм. Нагрузка $F = 15\,000$ Н. Модуль упругости стали принимаем $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

На рисунке 4.21 показана расчетная схема балки. На свободном конце балки предусмотрено небольшое отверстие ($\varnothing 10$ мм) для обеспечения приложения нагрузки в точке, лежащей на центральной оси. Это позволяет минимизировать реализацию дополнительных моментов.

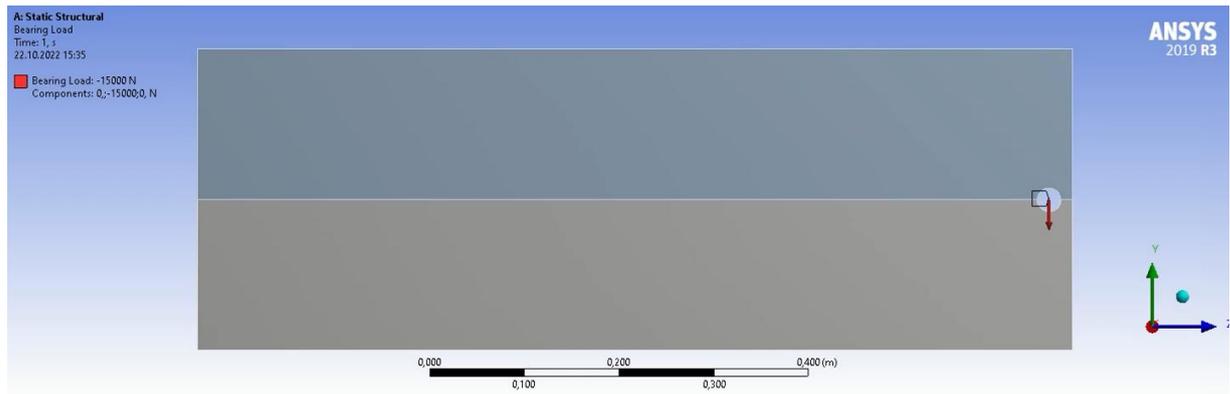


Рисунок 4.21 – Схема балки

При данном нагружении возникают нормальные (σ) и касательные (τ) напряжения. Нормальные напряжения реализуются от действия изгибающего момента M . Максимальное значение σ_{\max} возникает в заделке – зоне максимального изгибающего момента. Причем на нейтральной оси нормальные напряжения равны нулю. Касательные напряжения τ реализуются от действия поперечной силы Q . Они имеют максимальное значение на нейтральной оси, а на крайних волокнах равны нулю.

Максимальные значения нормальных и касательных напряжений определяются по следующим соотношениям [123]:

$$\sigma_{\max} = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 15\,000 \cdot 900}{10 \cdot 320^2} = 79,1 \text{ МПа.}$$

Расчет по программе ANSYS дает практически нулевые значения на центральной оси балки, а максимальное значение составляет 94,9 МПа (рисунок 4.22), что несколько выше рассчитанного по соотношениям «Сопrotивления материалов» значения 79,1 МПа. Возможной причиной такого расхождения является наличие податливых связей между узлами вблизи заделки, приводящее к концентрации напряжений.

Касательные напряжения выражаются следующим образом:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{b \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{15\,000}{10 \cdot 320} = 7,0 \text{ МПа.}$$

На рисунке 4.23 показано расчетное распределение касательных напряжений по длине балки в различных точках поперечного сечения.

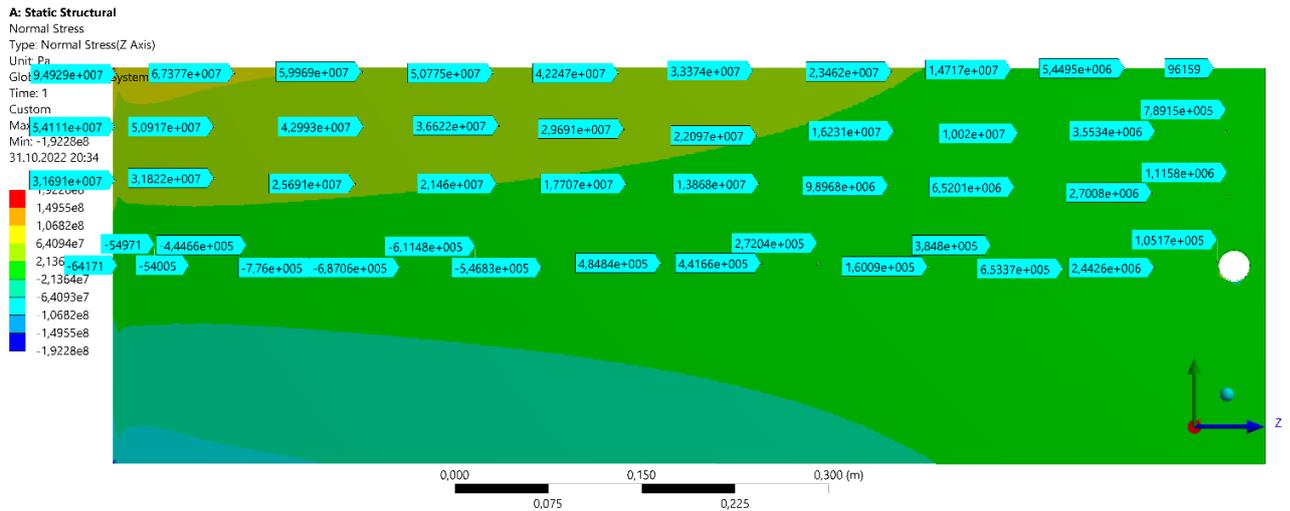


Рисунок 4.22 – Распределение нормальных напряжений

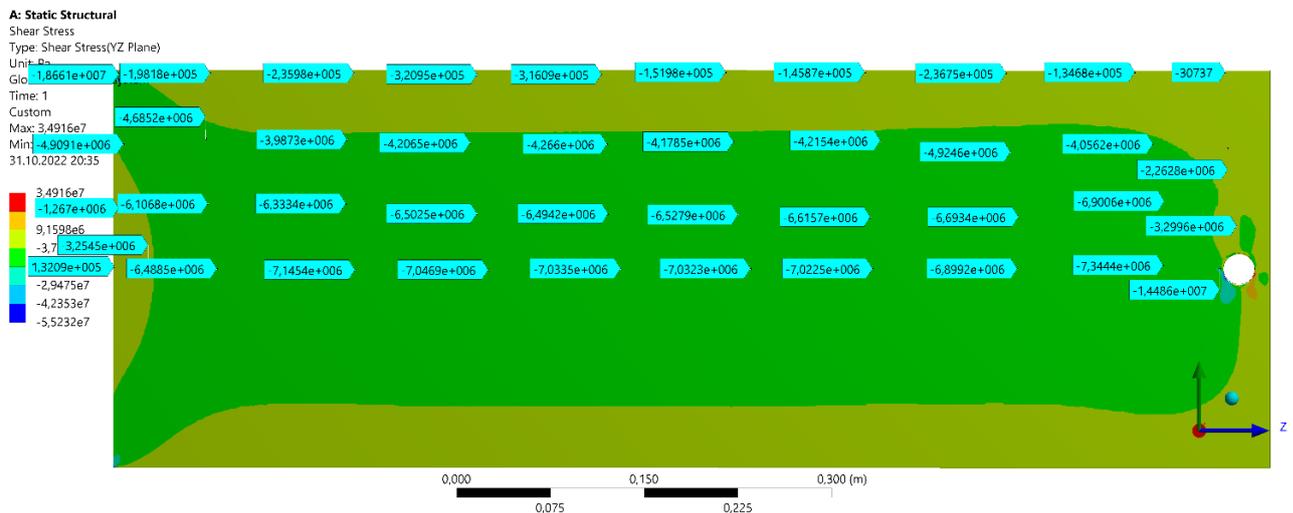


Рисунок 4.23 – Распределение касательных напряжений

По величинам касательных напряжений имеется достаточно хорошее совпадение расчетных величин, определенных методом «Сопротивления материалов» и по программе ANSYS.

Главные напряжения при изгибе связаны с нормальными и касательными напряжениями следующим образом:

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2}.$$

Отсюда следует, что $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ на верхнем растянутом волокне, а на нижнем волокне $\sigma_1 = 0$.

На центральной оси $\sigma_3 = \tau_{\max}$. Причем со знаком «минус». А на нижнем волокне $\sigma_3 = -\sigma_{\max}$. На верхнем волокне σ_3 равняется нулю.

Знание главных напряжений позволяет рассчитать величины эквивалентных напряжений, которые выдаются программой ANSYS (теория Мизеса – Хенки или критерий энергии формоизменения) [42]:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2},$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения.

Перемещение свободного конца балки вдоль оси Y при рассматриваемой схеме нагружения определяются из соотношения

$$Y_k = \frac{4 \cdot F \cdot l^3}{E \cdot b \cdot h^3} = \frac{34 \cdot 15\,000 \cdot 900^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 320^3} = 0,7 \text{ мм.}$$

График изменения осевого перемещения u вдоль оси балки показан на рисунке 4.24.

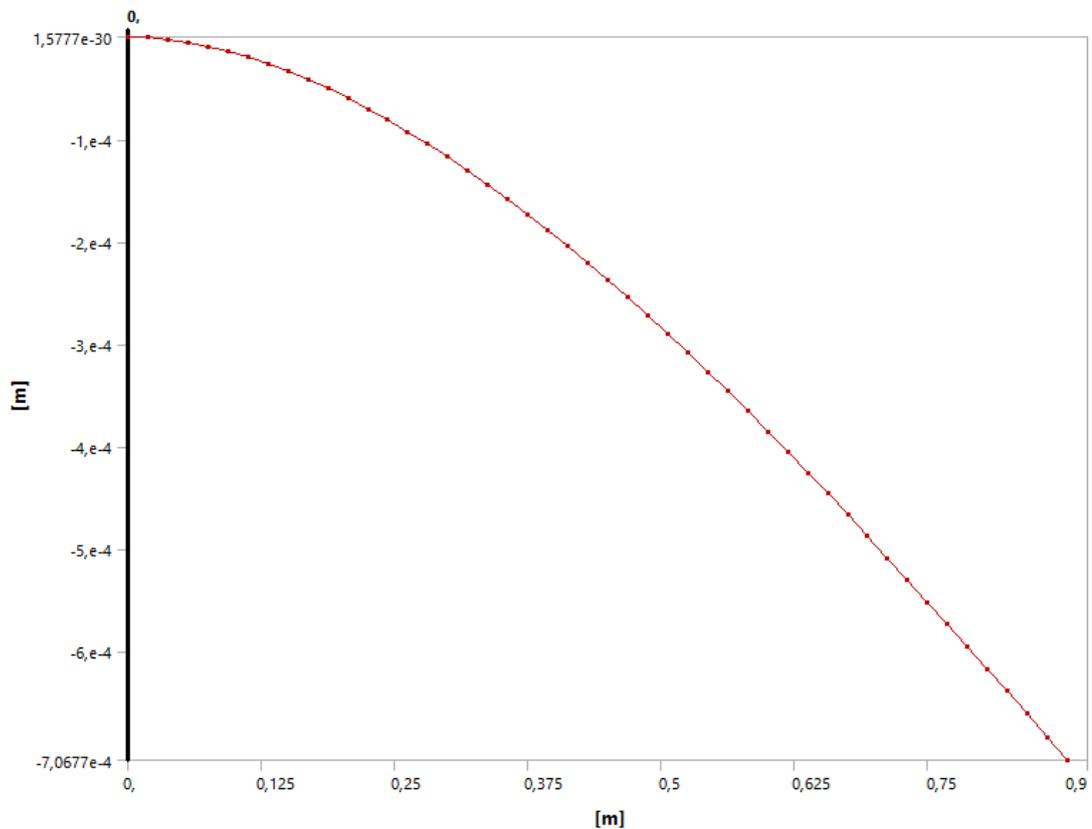


Рисунок 4.24 – Изменение осевого перемещения u вдоль оси балки

Максимальное перемещение реализуется на свободном конце балки, и его величины, рассчитанные разными подходами, практически совпадают.

Таким образом, логично заключить, что разработанная модель балки может быть основой модели геометрии зуба для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния зуба ковша экскаватора.

4.2.2. Расчет максимальных напряжений в зубе ковша экскаватора

Расчет напряженного-деформированного состояния зуба из обеих исследуемых сталей проводился при действии внешней нагрузки $F = 800$ кН как в упругой постановке, так и в упруго-пластической. Причем упруго-пластический расчет проводился для вариантов состояния поставки после шести и десяти циклов (N) ТЦО. По итогам расчетов определялись величины эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ и общих перемещений $\Delta_{\text{общ}}$. В графическом виде результаты расчетов представлены на рисунках 4.25–4.32.

На рисунках 4.24 и 4.25 приведены результаты расчетов компонентов НДС зуба в упругой постановке.

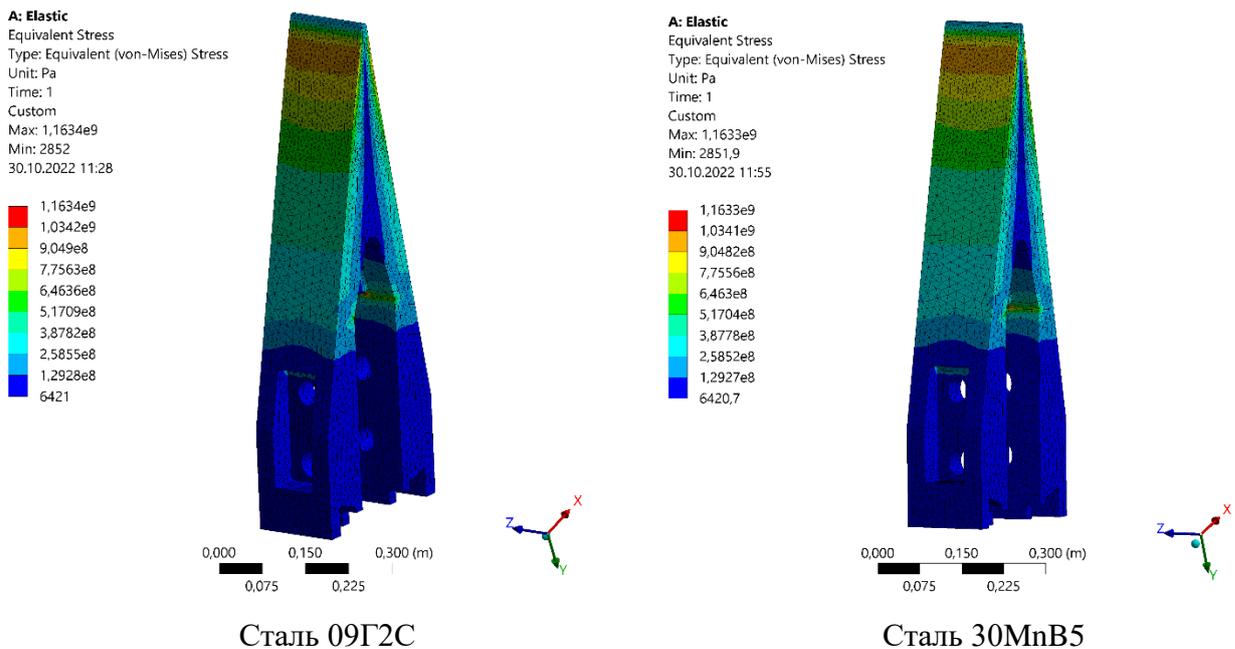


Рисунок 4.25 – Эквивалентные напряжения

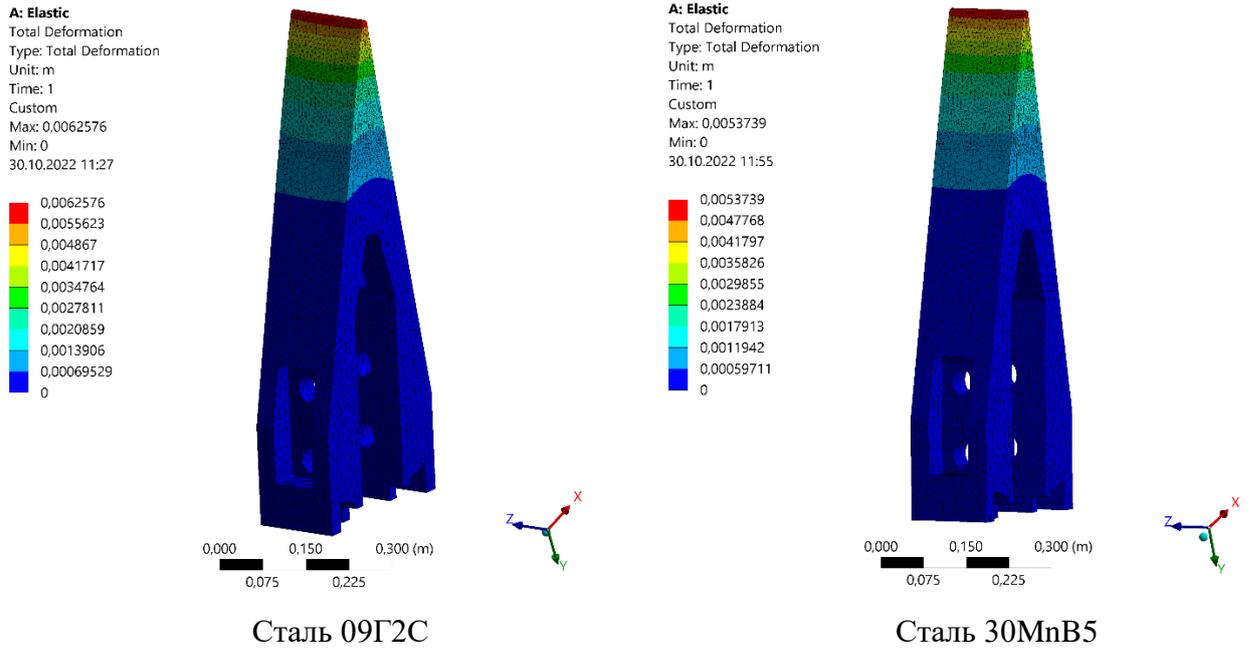


Рисунок 4.26 – Общие перемещения

На рисунках 4.27–4.32 приведены аналогичные распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ и общих перемещений $\Delta_{\text{общ}}$, полученные в результате расчетов в упруго-пластической постановке.

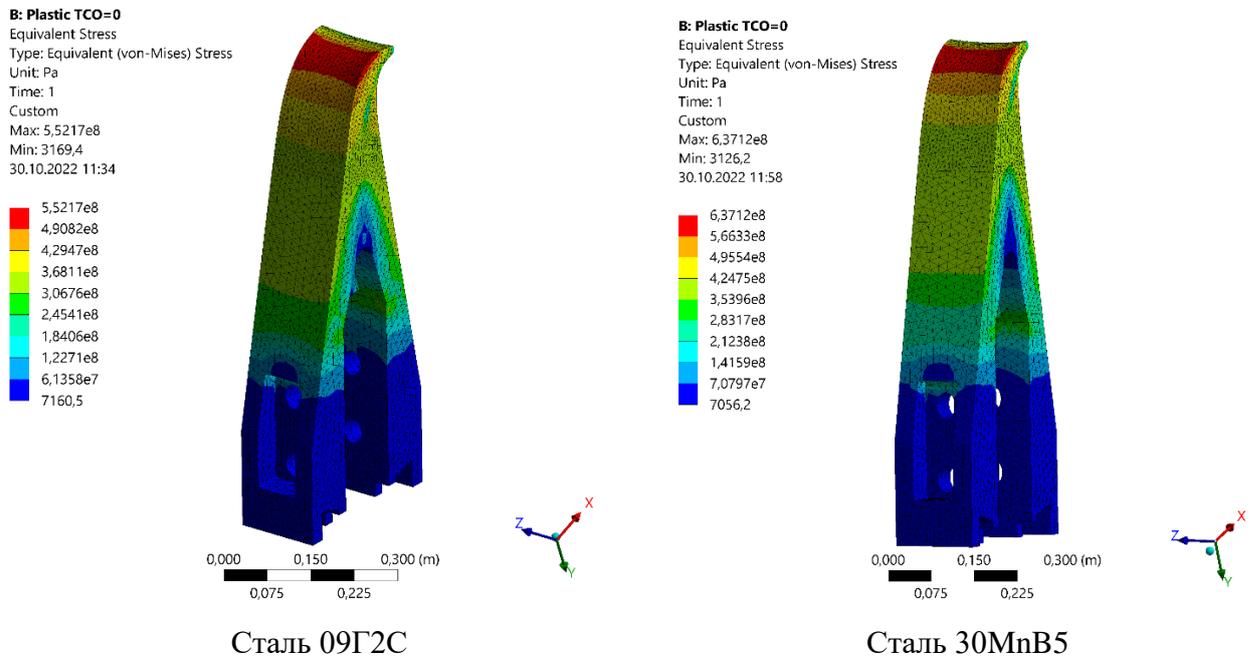
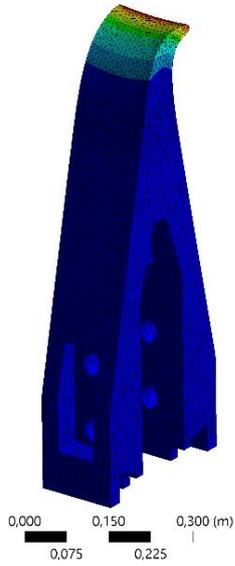
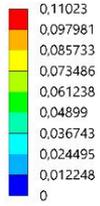


Рисунок 4.27 – Эквивалентные напряжения

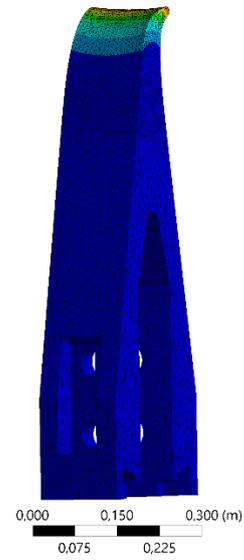
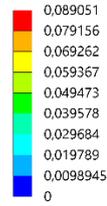
(состояние поставки, $N = 0$)

B: Plastic TCO=0
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,11023
 Min: 0
 30.10.2022 11:33



Сталь 09Г2С

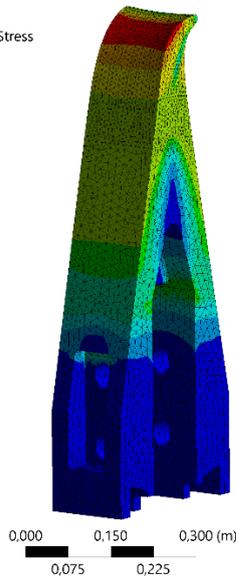
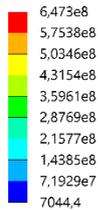
B: Plastic TCO=0
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,089051
 Min: 0
 30.10.2022 11:57



Сталь 30MnB5

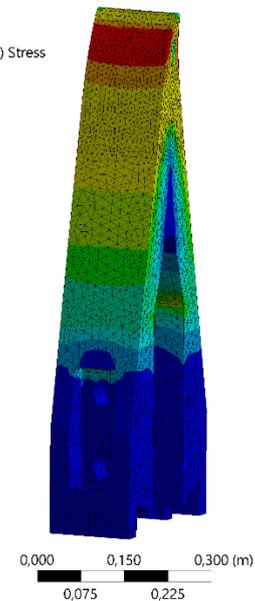
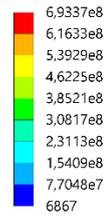
Рисунок 4.28 – Общие перемещения
 (состояние поставки, $N = 0$)

C: Plastic TCO=6
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1
 Custom
 Max: 6,473e8
 Min: 3121,1
 30.10.2022 11:39



Сталь 09Г2С

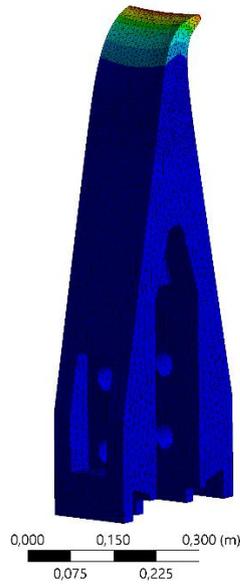
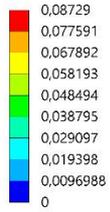
C: Plastic TCO=6
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1
 Custom
 Max: 6,9337e8
 Min: 3045,5
 30.10.2022 12:01



Сталь 30MnB5

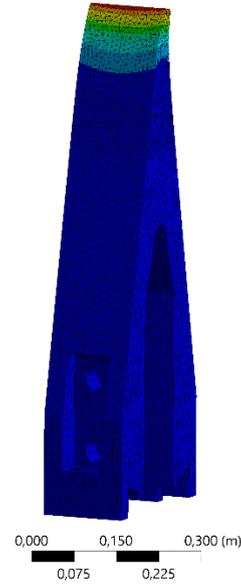
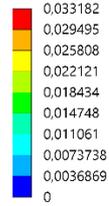
Рисунок 4.29 – Эквивалентные напряжения ($N = 6$)

C: Plastic TCO=6
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,08729
 Min: 0
 30.10.2022 11:38



Сталь 09Г2С

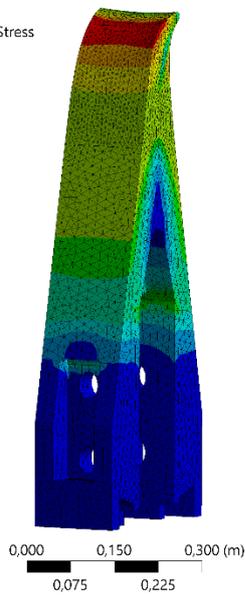
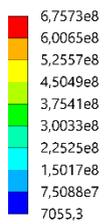
C: Plastic TCO=6
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1
 Custom
 Max: 0,033182
 Min: 0
 30.10.2022 12:00



Сталь 30MnB5

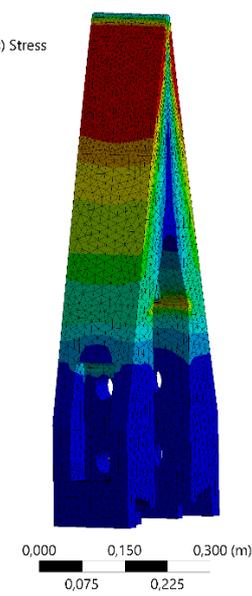
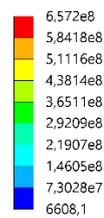
Рисунок 4.30 – Общие перемещения ($N = 6$)

D: Plastic TCO=10
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1
 Custom
 Max: 6,7573e8
 Min: 3125,9
 30.10.2022 11:42



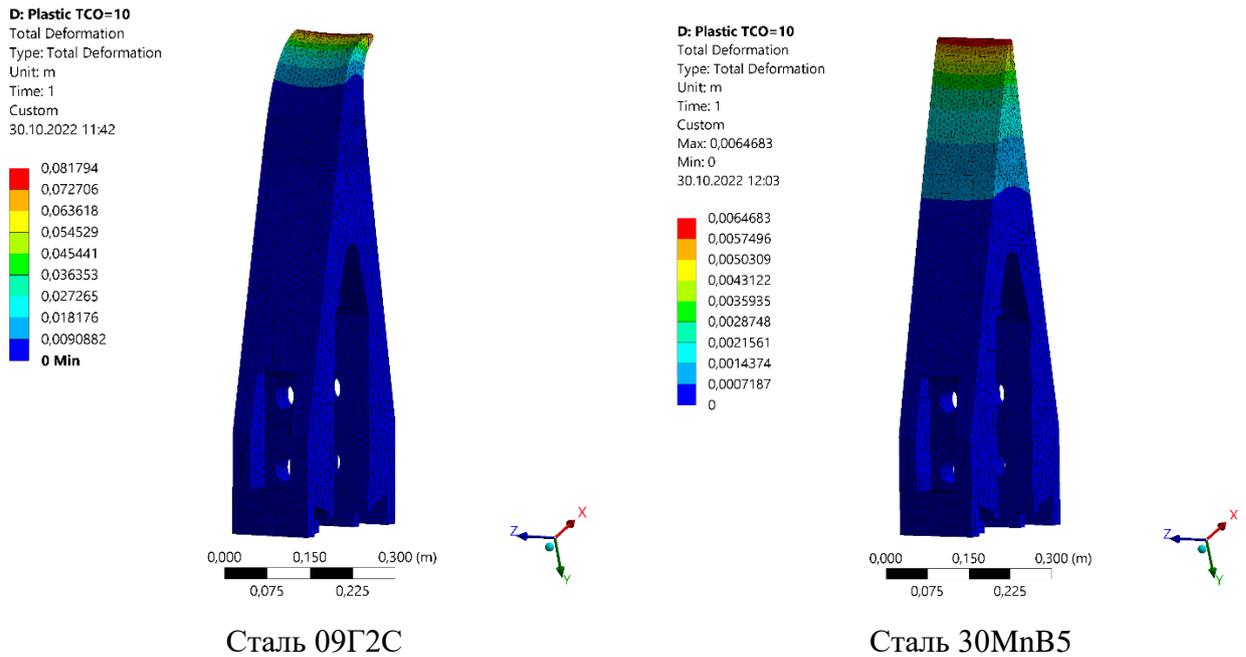
Сталь 09Г2С

D: Plastic TCO=10
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1
 Custom
 Max: 6,6081e8
 Min: 2932,5
 30.10.2022 12:04



Сталь 30MnB5

Рисунок 4.31 – Эквивалентные напряжения ($N = 10$)

Рисунок 4.32 – Общие перемещения ($N = 10$)

В таблице 4.10 приведены максимальные значения эквивалентных напряжений и общих перемещений для всех рассматриваемых вариантов расчетов.

Таблица 4.10 – Результаты расчетов НДС зуба

Характеристика	Сталь		
	09Г2С	30MnB5	
Упругий расчет			
$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	1163	1163	
$\Delta_{\text{общ}}$, мм	6	5	
Упруго-пластический расчет			
$N = 0$	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	552	637
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	110	89
$N = 6$	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	647	693
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	87	33
$N = 10$	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	676	657
	$\Delta_{\text{общ}}$, мм	82	6

Представленные на рисунках 4.24–4.31 и в таблице 4.10 данные позволяют сделать следующие выводы:

➤ влияние пластичности исследуемых сталей сказывается на уровне $\sigma_{\text{ЭКВ}}$: при расчетах компонентов НДС зуба в упруго-пластической постановке полу-

чается, что уровень максимальных эквивалентных напряжений оказывается практически в два раза меньше уровня, полученного при расчетах в упругой постановке;

- распределение эквивалентных напряжений по длине зуба остается практически неизменным, меняется лишь протяженность зон с одним уровнем $\sigma_{\text{экв}}$;
- величины общих перемещений при различных постановках расчетов различаются существенно: наличие пластических деформаций сказывается на появлении изгиба незакрепленной части зуба;
- для стали 30MnB5 уровень пластических деформаций (общих перемещений) оказывается ниже соответствующих показателей стали 09Г2С.

Отметим, что характер деформирования зуба, полученный в рамках данной диссертации, совпадает с картиной деформирования зуба ковша экскаватора, изготовленного из стали Гарфилда, который также был рассчитан с использованием программы ANSYS. Результаты расчета изложены в статье [124] и приведены на рисунке 4.33.

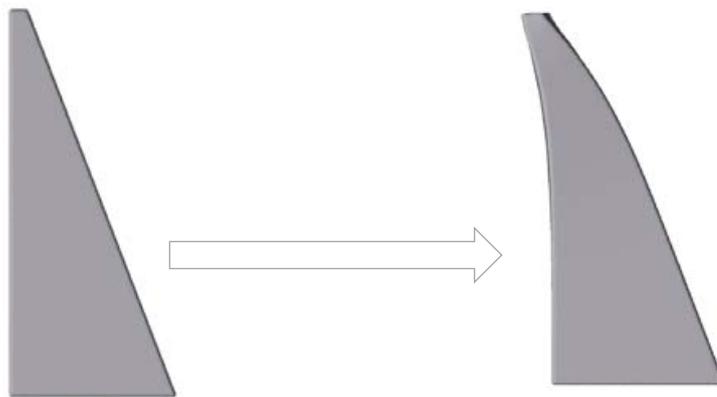


Рисунок 4.33 – Деформирование зуба ковша экскаватора

К сожалению, отсутствие сведений о геометрических параметрах зуба, а также о величине и направлении приложения нагрузки не позволяет провести количественное сопоставление полученных результатов. Впрочем, как отмечалось выше, характер деформирования зуба в обоих расчетах идентичен.

4.2.3. Расчет максимальных напряжений в зубе ковша экскаватора при наличии трещины

Расчет напряженно-деформированного состояния в зубе ковша экскаватора с трещиной проводился для трех значений количества термоциклов N (0; 6; 10) вплоть до момента достижения в вершине трещины критического значения коэффициента интенсивности напряжений (см. п. 4.1.8). То есть для стали 09Г2С это значения K_{Ic} , равные 60,0; 65,4 и 65,4 МПа·м^{1/2} соответственно. Для стали 30MnB5 критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} равно 168,5; 303,3 и 734,7 МПа·м^{1/2}. Нагрузка к зубу ковша экскаватора приложена так же, как и для вариантов расчета без трещины.

На рисунке 4.34 показаны распределения эквивалентных напряжений по телу зуба для вариантов его конструктивного исполнения из сталей 09Г2С и 30MnB5. В целях наглядности приведены эпюры напряжений, реализуемых в случае проведения шести циклов ТЦО ($N = 6$).

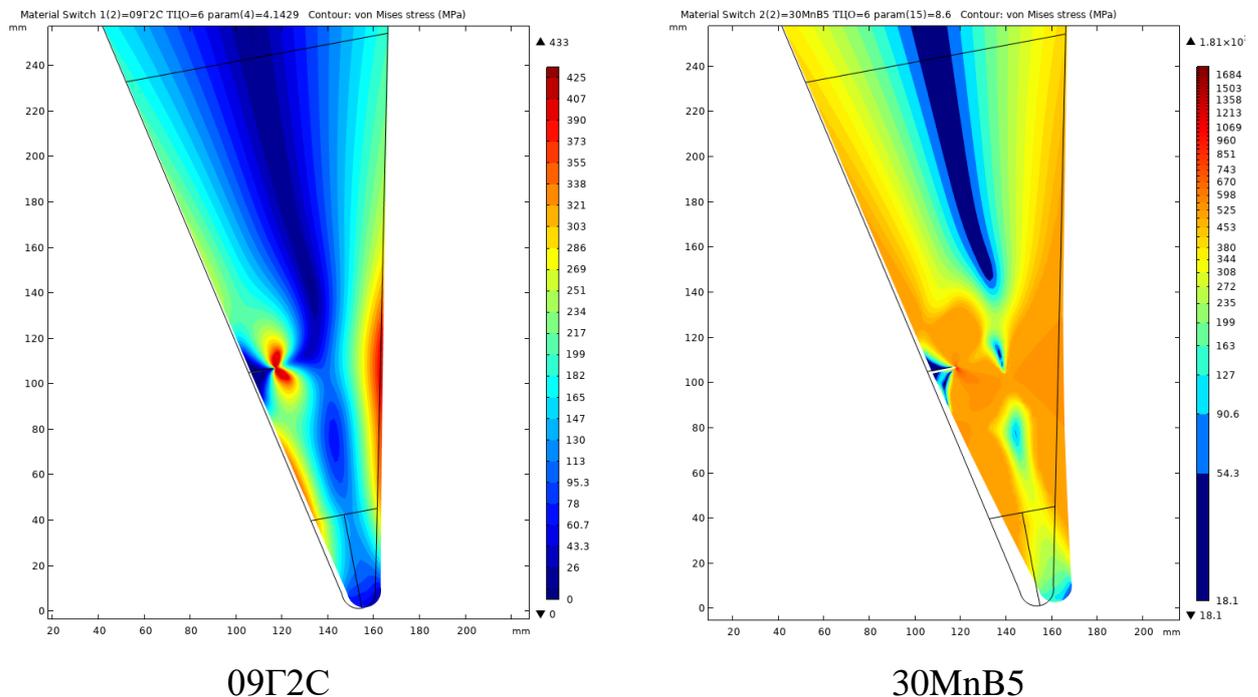


Рисунок 4.34 – Распределение напряжений в зубе ковша при наличии трещины

Как видно из рисунка 4.34, в вершине трещины реализуются эквивалентные напряжения, равные соответствующему значению предела текучести материала

зуба на растяжение. При этом для стали 09Г2С в зоне, противоположной трещине, возникают напряжения, близкие по величине к пределу текучести. Для стали 30MnB5 эти напряжения существенно меньше предела текучести.

Кроме того, видно, что сталь 30MnB5 допускает более существенные величины раскрытия трещины и, следовательно, большие перемещения свободного конца зуба.

Аналогичные распределения эквивалентных напряжений по телу зуба ковша были получены для $N = 0$ и $N = 10$. То есть во всем диапазоне изменения числа циклов термоциклической обработки зуб ковша экскаватора, выполненный из стали 30MnB5, оказывается менее чувствительным к наличию трещины, чем в варианте исполнения зуба из стали 09Г2С.

Недостаток расчета напряжений в зубе в статической постановке состоит в том, что при достижении эквивалентными напряжениями величины предела текучести трещина должна была увеличить свою длину. Однако изменения «живой» площади поперечного сечения при статической постановке не происходит. Поэтому были проведены расчеты для нагрузок, превышающих те, которые потребовались для достижения пределов текучести. На рисунке 4.35 приведены зависимости, иллюстрирующие изменение эквивалентных напряжений в окрестности вершины трещины (см. рисунок 3.11) от величины приложенного усилия F .

На рисунке 4.35 явно виден упругий участок, граница которого совпадает с местом достижения значений пределов текучести. Затем данная зависимость приобретает резкий излом, связанный с тем, что трещина своего размера не меняет и в зубе начинает реализовываться пластическая деформация. При этом разница в усилиях составляет порядка 30 %. Для стали 09Г2С предел текучести достигается при усилии 16 345 Н, а для стали 30MnB5 – 21 300 Н. Кажущаяся близость величин усилий связана с работой зуба ковша в упругой области. Дальнейшее повышение величины приводит к росту эквивалентных напряжений (в расчете величина усилия была ограничена верхним значением 150 000 Н). Но на всем участке деформирования зуба сталь 30MnB5 показывает более высокие значения усилия, т. е. имеет преимущество перед сталью 09Г2С.

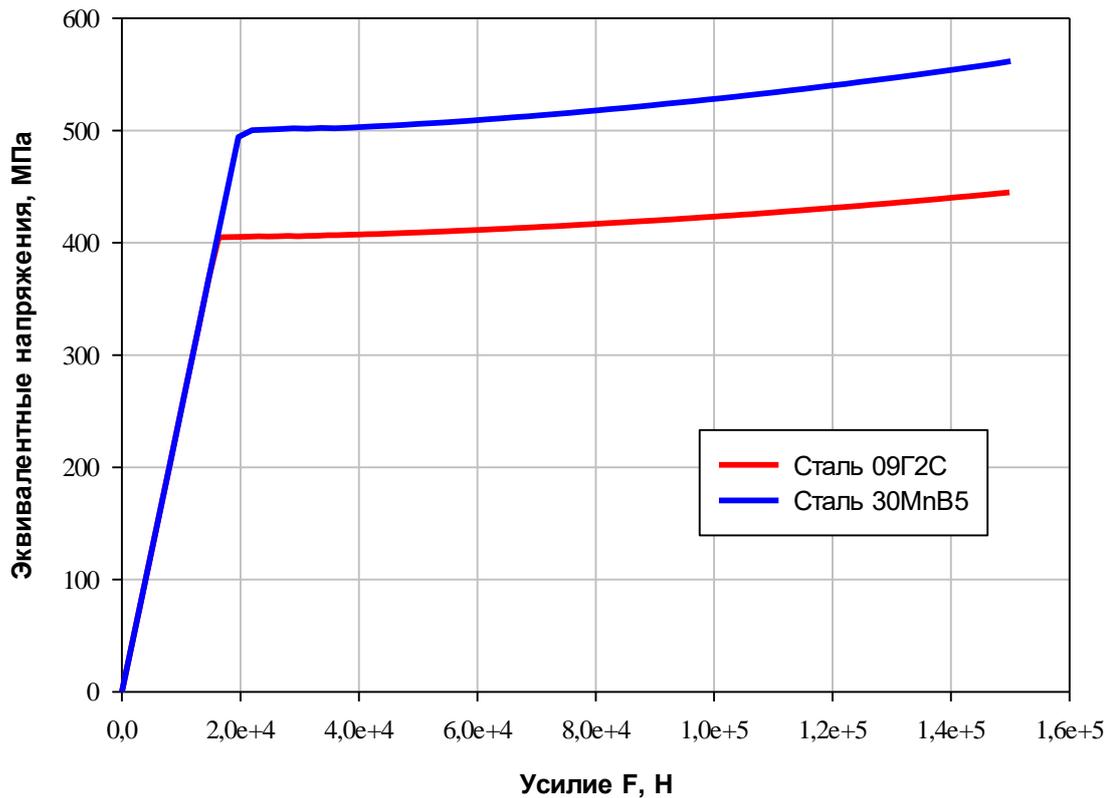


Рисунок 4.35 – Зависимость эквивалентных напряжений от приложенного усилия

4.3. Заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5

4.3.1. Технический аспект вопроса замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5

Результаты проведенных в рамках данной диссертации расчетно-экспериментальных исследований физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5 сведены в таблицу 4.11. Чтобы облегчить читателю сопоставление величин, данные представлены в виде диапазонов их изменения в зависимости от числа циклов ТЦО.

В таблице 4.11, помимо характеристик сталей, приведено отношение σ_b / σ_T , рассматриваемое в качестве меры пластичности материалов [47].

Таблица 4.11 – Результаты расчетно-экспериментальных исследований физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5

Параметр	Сталь	Величина	
		Поставка	ТЦО
Предел текучести при растяжении, МПа	09Г2С	357	371÷410
	30MnB5	400	410÷710
Предел прочности при растяжении, МПа	09Г2С	446	468÷507
	30MnB5	650	750÷1700
Модуль упругости, МПа	09Г2С	$2,01 \cdot 10^5$	$(1,99 \div 2,01)10^5$
	30MnB5	$2,34 \cdot 10^5$	$(2,13 \div 2,41)10^5$
Относительное удлинение, %	09Г2С	16	10÷15
	30MnB5	32	19÷30
Относительное сужение, %	09Г2С	24	16÷23
	30MnB5	46	47÷52
Предел текучести при сжатии, МПа	09Г2С	265	268÷349
	30MnB5	330	333÷434
Прочность при изгибе, МПа	09Г2С	841	850÷1106
	30MnB5	1203	1216÷1582
Предел выносливости, МПа	09Г2С	150	158÷177
	30MnB5	195	228÷561
Твердость <i>HV</i> , МПа	09Г2С	1120	1140÷1450
	30MnB5	1520	1570÷2150
Износостойкость, Γ^{-1}	09Г2С	0,66	0,67÷0,74
	30MnB5	0,94	0,97÷1,23
Трещиностойкость, МПа · м ^{1/2}	09Г2С	60	63,4÷65,4
	30MnB5	168,5	229,2÷734,7
Отношение σ_b / σ_T	09Г2С	1,25	1,22÷1,25
	30MnB5	1,63	1,66÷2,78

Большинство характеристик рассматриваемых сталей определено экспериментальным путем. Такие параметры, как статическая трещиностойкость и износостойкость, получены расчетным путем с использованием экспериментальных результатов при одноосном растяжении. Прямых экспериментов по определению износостойкости и трещиностойкости сталей 09Г2С и 30MnB5 очень мало, а по влиянию количество циклов N ТЦО они просто отсутствуют. Например, стали 09Г2С в состоянии поставки критический коэффициент интенсивности напряжений, согласно данным работы [125], составляет $57 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Это отличается от расчетного значения $60 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, приведенного в таблице 4.11, на 5 %. Такое не-

большое различие говорит о практическом совпадении расчетного и экспериментального значений трещиностойкости. Впрочем, других экспериментальных данных нет. Поэтому в дальнейшем потребуются проверка расчетных значений данных параметров.

Из приведенных в таблице 4.11 данных видно, что по всем характеристикам сталь 30MnB5 превосходит сталь 09Г2С. Этот факт особенно важен в контексте двух моментов. Во-первых, при расчетах прочности деталей ДСМ основными механическими характеристиками являются показатели пределов текучести и прочности при растяжении [79]. Именно по этим характеристикам определяется большинство запасов прочности (см. таблицу А1 в приложении А). Более высокий уровень этих механических характеристик соответственно обеспечивает более высокое значение запаса прочности. Следствием этого является либо уменьшение размеров рабочих (несущих) сечений деталей ДСМ, либо расширение эксплуатационных характеристик машин в части обработки более прочных грунтов.

Во-вторых, важную роль с точки зрения конструкционной прочности деталей играет уровень пластичности материала. Низкий уровень данной характеристики означает повышение чувствительности деталей к различного рода концентраторам напряжений. По данным, приведенным в таблице 4.11, видно, что у стали 30MnB5 не только уровни относительного удлинения и относительного сужения выше, чем у стали 09Г2С, но и отношение σ_b / σ_T . Причем это касается как состояния поставки, так и всех циклов ТЦО. В конечном счете для стали 30MnB5 характерна значительно большая трещиностойкость, чем у стали 09Г2С.

Необходимо отметить, что обе исследуемых стали имеют невысокий уровень износостойкости по сравнению со специальными сталями. Поэтому в определенных случаях для успешной эксплуатации элементов ДСМ могут быть предусмотрены дополнительные меры, такие как термообработка, наплавка, износостойкие накладки и т. п.

Таким образом, чтобы обеспечить более высокий уровень прочностных и пластических характеристик деталей, предпочтительно использовать сталь 30MnB5.

4.3.2. Показатели надежности работоспособности деталей

Для оценки возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5 с точки зрения надежности рассмотрим модель «Нагрузка q – прочность r », которые являются случайными величинами [81]. В графическом виде данная модель показана на рисунке 4.36.

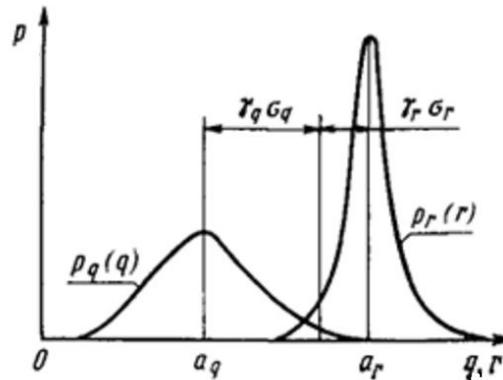


Рисунок 4.36 – Модель «Нагрузка q – прочность r »

Здесь приняты следующие обозначения:

- P_q и P_r – плотность вероятности нагрузки и прочности соответственно;
- a_q и a_r – математические ожидания нагрузки и прочности соответственно;
- σ_q и σ_r – средние квадратичные отклонения нагрузки и прочности соответственно;
- γ_q и γ_r – гауссовский уровень надежности нагрузки и прочности соответственно.

В случае известных функций P_q и P_r данная модель может служить для назначения коэффициентов запаса прочности. При этом можно рассматривать несколько подходов к назначению запаса: отношение математических ожиданий прочности и нагрузки, отношение минимального значения прочности к максимальному значению нагрузки и т. д.

Такая модель может быть использована для оценки вероятности разрушения деталей. Для этой цели служит характеристика безопасности β (встречаются

и другие названия: гауссовская мера надежности, индекс надежности и др.), определяемая из следующего соотношения [81, 82, 126, 127]:

$$\beta = \frac{a_r - a_q}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_q^2}}.$$

В рамках данной диссертационной работы были исследованы зависимости механических характеристик (предел текучести и предел прочности) сталей 09Г2С и 30MnB5 от числа циклов N термоциклической обработки. В работе [25] автором было предложено использовать значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b , вычисленные по полученным зависимостям $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$, в качестве средних значений, т. е. a_q и a_r . С учетом наличия зависимости данных параметров от числа N выражение для характеристики безопасности может быть переписано в виде

$$\beta(N) = \frac{a_r(N) - a_q}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_q^2}}.$$

С помощью данной характеристики может быть оценена вероятность $P(\beta, N)$ неразрушения конструкции (детали). То есть надежность конструкции выражается следующей формулой [126]:

$$P(\beta, N) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\beta(N)^2 - 1}{\beta(N)^3} \cdot \exp \frac{-\beta(N)^2}{2}.$$

Поскольку запасы прочности оцениваются либо по пределу текучести $\sigma_{0,2}$ (отсутствие пластических деформаций), либо по пределу прочности σ_b (отсутствие разрушения), то по аналогии величина β также может быть оценена по этим двум характеристикам сталей.

Зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$ также были использованы в работе [25] для оценки значений средних квадратичных отклонений величин пределов текучести и прочности, а именно:

$$\sigma_{r0,2} = S_{\sigma_{0,2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{0,2i}^{\text{э}} - \sigma_{0,2i}^{\text{т}})^2}{n-1}} \quad \text{и} \quad \sigma_{rb} = S_{\sigma_b} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{bi}^{\text{э}} - \sigma_{bi}^{\text{т}})^2}{n-1}}.$$

Здесь величины с индексом «э» относятся к экспериментальному результату, а с индексом «т» – к расчетному (по соответствующему соотношению). Вели-

чина n представляет собой количество экспериментальных точек по значениям N (в рамках данного расчета с целью увеличения статистики были объединены результаты испытаний нестандартных плоских и стандартных цилиндрических образцов). Вычисленные значения $S_{\sigma_{0,2}}$ и S_{σ_b} приведены в таблице 4.12.

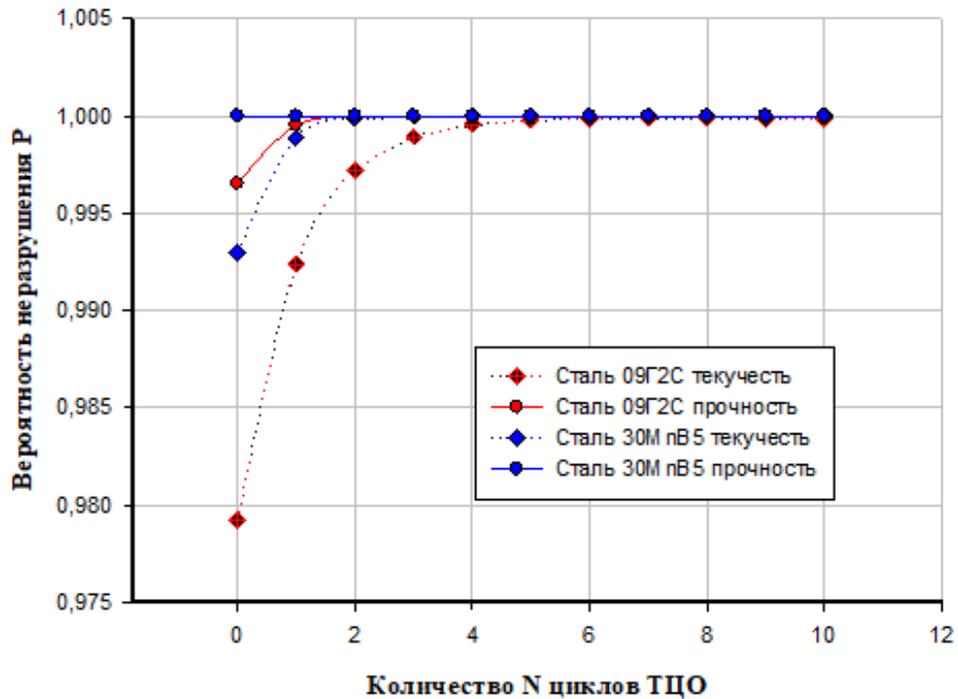
Таблица 4.12 – Значения $S_{\sigma_{0,2}}$ и S_{σ_b} сталей 09Г2С и 30МnВ5

Параметр	Сталь	
	09Г2С	30МnВ5
$S_{\sigma_{0,2}}$, МПа	1,9	16,9
S_{σ_b} , МПа	2,8	42,7

Параметр β вычисляется по математическим ожиданиям показателей прочности (a_r) и нагрузки (a_q). Для сравнительной оценки вероятности неразрушения деталей из двух сталей примем в качестве математического ожидания напряжений от действующей нагрузки расчетное минимальное значение предела текучести с запасом 1,2. Согласно проведенным расчетам минимальное значение имеет предел текучести стали 09Г2С в состоянии поставки $\sigma_{0,2} = 359$ МПа. С учетом запаса имеем математическое ожидание напряжения от действующей нагрузки $a_q = 300$ МПа.

Второй характеристикой, необходимой для вычисления параметра β , является среднее квадратичное отклонение σ_q напряжений от действия нагрузки. Определим его значение через коэффициент вариации нагрузки. Данная статистическая характеристика меняется в достаточно широком диапазоне – от 1÷2 до 20÷30 % [126]. Для проведения оценки вероятности неразрушения детали примем коэффициент вариации нагрузки 10 %. Отсюда вытекает, что среднее квадратичное отклонение напряжений от нагрузки составляет 30 МПа.

На рисунке 4.37 в графическом виде представлены результаты расчетов вероятности неразрушения $P(\beta, N)$ одинаковых деталей, выполненных из сталей 09Г2С и 30МnВ5 в зависимости от количества N циклов ТЦО.

Рисунок 4.37 – Зависимость $P = f(\beta, N)$

Из рисунка 4.35 видно, что обе стали обеспечивают высокий уровень вероятности неразрушения при заданном уровне нагрузки (≈ 1) – после шести циклов ТЦО для стали 09Г2С и после второго цикла для стали 30МnВ5 по пределу текучести. По пределу прочности вероятность неразрушения для этой стали равна 1 уже в состоянии поставки. Для стали 09Г2С вероятность неразрушения по пределу прочности выходит на максимальный уровень после одного цикла ТЦО.

В данном расчете существует определенная условность. Она заключается в выбранных величинах напряжений от действия нагрузки и коэффициентов вариации. Это сказалось на расчетной надежности деталей из стали 09Г2С, которая оказались ниже, особенно при использовании в качестве критерия работоспособности предела текучести. Снижение уровня напряжений от действия нагрузки повысит вероятность неразрушения. Впрочем, более рациональным представляется использование деталей из стали 30МnВ5, способных работать при более высоких нагрузках.

4.3.3. Целесообразность замены сталей с экономической точки зрения

Как было показано ранее (п. 4.3.2) замена стали 09ГС на сталь 30MnB5 приводит к повышению вероятности неразрушения деталей, то есть к повышению надежности изделий. Экономический эффект от использования деталей с повышенной надежностью может быть обусловлен рядом причин [128].

Во-первых, следствием повышения надежности детали является увеличение ее наработки на отказ. В свою очередь, это приводит к уменьшению количества отказов и затрат на их устранение, включая заработную плату ремонтных рабочих, стоимость запасных частей и материалов и т. д.

Во-вторых, следствием повышения безотказности является увеличение времени эффективной работы машины из-за уменьшения времени простоя в ремонте.

Очевидно, что количественную оценку экономической эффективности по какому-либо показателю можно поставить только при наличии исходных данных для расчета, включая номенклатуру изделий с повышенной надежностью.

В рамках данной диссертации оценивается возможность замены одной стали на другую при изготовлении отдельных деталей рабочих органов ДСМ. При этом объемы реализации такой замены на момент принятия решения и уровни эксплуатационных нагрузок в полной мере не определены. Поэтому в такой ситуации можно дать лишь сравнительную оценку экономической эффективности мероприятий по замене материала деталей [129].

В качестве сравниваемого параметра рассмотрим наработку на отказ T_o . Данный показатель представляет собой вероятность того, что отказа детали не произойдет в пределах заданной наработки или в течение заданного времени [130]. Величина наработки T_o определяется из соотношения [131]:

$$T_o = \int_0^{\infty} P(\tau) d\tau,$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы детали в течение времени t .

Методы контроля показателей надежности и планы испытаний установлены требованиями ГОСТ 27.410–87 [132]. При этом должны быть выбраны и сформу-

лированы критерии отказов и предельных состояний [133]. Предположим, что отказ линейно зависит от предельного значения механической характеристики исследуемых сталей. То есть при достижении данным параметром своего предельного значения происходит отказ детали. Это открывает возможность для проведения сравнительной оценки наработки детали, изготовленной из разных сталей, с опорой на относительную величину критерия отказа.

В таблице 4.13 для различного числа циклов N ТЦО приведены относительные величины критериев отказа, т. е. отношения какого-то параметра для стали 30MnB5 к аналогичному показателю для стали 09Г2С:

- разрушение детали – отношение пределов прочности $K_{пр}$;
- потеря формы детали – отношение пределов текучести $K_{тек}$;
- разрушение при действии циклических нагрузок – отношение пределов выносливости $K_{вын}$;
- износ детали – отношение износостойкости $K_{из}$;
- снижение чувствительности к трещинам – отношение трещиностойкости $K_{тр}$.

Таблица 4.13 – Относительные величины критериев отказа

К	N										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{пр}$	1,46	1,60	1,58	1,60	1,70	1,81	1,89	1,98	3,02	3,33	3,35
$K_{тек}$	1,12	1,11	1,08	1,07	1,19	1,21	1,23	1,47	1,49	1,49	1,49
$K_{вын}$	1,30	1,44	1,42	1,47	1,55	1,65	1,74	1,85	2,81	3,14	3,17
$K_{из}$	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,50	1,50	1,50	1,60	1,70	1,7
$K_{тр}$	2,81	3,50	3,56	3,69	3,90	4,32	4,64	4,23	9,53	11,23	11,23

Как видно из таблицы 4.13, минимальная относительная величина критерия отказа реализуется по требованию отсутствия пластической деформации и составляет 1,07. Необходимо обратить внимание еще на один момент. С увеличением числа циклов термоциклической обработки данный коэффициент может быть увеличен до 1,49. При этом определяющим критерием отказа по-прежнему будет оставаться именно требование отсутствие пластических деформаций. То есть при

замене материала детали с 09Г2С на 30MnB5 наработка до отказа может быть увеличена в зависимости от количества термоциклов от 7 до 49 %.

Чтобы дать пример оценки степени влияния замены марки стали, приведем данные по эксплуатации рабочего оборудования экскаватора ЭО-4225 за 2007–2008 гг. [134]. Согласно этим данным, наработка на отказ составила 2650 часов. При этом средняя продолжительность ремонта τ_b была зафиксирована на уровне 5,7 часа. Полагая, что детали рабочего оборудования были выполнены из стали 09Г2С (сталь 30MnB5 еще не внедрена), получаем увеличение наработки на отказ в случае замены материала деталей с 2835,5 часа (для коэффициента $K_{тек} = 1,07$) до 3948,5 часа (для $K_{тек} = 1,49$).

Эти данные позволяют (при условии сохранения величины времени восстановления τ_b) оценить коэффициент готовности оборудования K_r из следующего соотношения [134]:

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + \tau_b}.$$

При подстановке численных значений величин, входящих в данное соотношение, получается, что коэффициент готовности элементов рабочего оборудования с исходного значения 0,9979 увеличивается до 0,9980÷0,9986.

4.4. Выводы по главе 4

1. Исследованы механические характеристики сталей 09Г2С и 30MnB5 при испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб и циклическое нагружение. Приведены экспериментальные результаты определения механических характеристик при изменении числа циклов термоциклической обработки от 0 (состояние поставки) до 10. Для каждой характеристики материалов подобраны аппроксимационные зависимости, связывающие величину механической характеристики с числом циклов ТЦО. Коэффициент регрессии данных зависимостей имеет высокие значения – от 0,93 до 0,999.

2. Для пределов текучести и прочности исследуемых сталей проведена проверка закона Холла – Петча. Близость корреляционных зависимостей к линей-

ной функции (высокие значения коэффициента корреляции) говорит о том, что данная закономерность для сталей 09Г2С и 30MnB5 выполняется.

3. Распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. В зоне сварного шва превышение микротвердости над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – порядка 20÷30 единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше, чем в случае стали 30MnB5.

4. Расчетным путем с использованием данных по одноосному растяжению образцов оценены параметры износостойкости и трещиностойкости сталей 09Г2С и 30MnB5.

5. Расчетами с применением программного комплекса ANSYS установлено, что влияние пластичности исследуемых сталей сказывается на уровне $\sigma_{\text{экв}}$: расчеты компонентов НДС зуба ковша экскаватора в упруго-пластической постановке показывают, что уровень максимальных эквивалентных напряжений практически в два раза ниже уровня, полученного при расчетах в упругой постановке. Наличие пластических деформаций сказывается на появлении изгиба незакрепленной части зуба ковша экскаватора; при этом для стали 30MnB5 уровень пластических деформаций (общих перемещений) оказывается ниже соответствующих показателей стали 09Г2С. Показано, что зуб ковша экскаватора из стали 30MnB5 по сравнению со сталью 09Г2С менее чувствителен к наличию в нем трещин.

6. Рассмотрены технический, надежностный и экономический аспекты возможности замены стали 09Г2С и 30MnB5 для изготовления деталей ДСМ. Показано, что результаты расчетных оценок и экспериментов по всем трем направлениям говорят о возможности такой замены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решение задачи определения максимальных напряжений, возникающих в ноже бульдозера или автогрейдера при работе по перемещению грунта, показывает, что ключевые физико-механические характеристики материала ножа, необходимые для обоснования его прочности, – это пределы текучести и прочности. Данные характеристики играют главную роль при назначении коэффициентов запасов прочности при различных типах действующих усилий (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и т. д.). Представлено описание методических подходов к назначению коэффициентов запаса прочности. Рассмотрены пути повышения уровня физико-механических характеристик материалов и прочности деталей: РКУП, КВД, термическая обработка, поверхностная обработка деталей и применение нанопорошков. Описаны эффекты влияния размера зерна на такие физико-механические характеристики, как твердость, пределы текучести и прочности, относительное удлинение при разрыве.

2. Рассмотрены критерии работоспособности дорожно-строительных машин: прочность, жесткость, износостойкость, теплостойкость и виброустойчивость. Дана привязка данных критериев к геометрическим параметрам деталей и свойствам материалов, из которых они изготовлены. Рассмотрены материалы, традиционно применяемые в конструкциях ДСМ. В качестве материалов для исследований в настоящей диссертационной работе используются стали 09Г2С и 30MnB5. Описан алгоритм принятия решения о замене одного материала детали ДСМ другим. Совокупность основных и дополнительных характеристик материалов, а также наличие эмпирических соотношений, связывающих отдельные характеристики друг с другом, складывается в комплекс физико-механических характеристик. Причем наличие такого комплекса полезно не только при решении задачи замены материала конкретной детали, но и в рамках других задач, требующих знания величин физико-механических характеристик. Описаны принципы ТЦО сталей, знание которых поможет повысить их механические характеристики. Проведен анализ имеющихся данных по результатам ТЦО сталей 09Г2С

и 30MnB5. На основе представленных сведений о стали 09Г2С и предварительных экспериментов для стали 30MnB5, проведенных автором данной диссертационной работы, были выбраны следующие режимы предварительной термической обработки исследуемых сталей. Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30MnB5 проводилась по такому режиму: закалка (860÷900) °С плюс отпуск (400÷600) °С. Термоциклическая обработка заключалась в проведении до десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

3. Описаны методики и условия проведения испытаний, осуществленных в рамках данной диссертационной работы. Для каждого вида испытания приведено описание образцов и указано используемое оборудование. Представлены сведения о погрешностях измерения исследуемых величин. Описана КЭ-модель зуба ковша экскаватора, с помощью которой проводится расчет напряженно-деформированного состояния данного рабочего органа ДСМ с целью оценки влияния уровня пластических характеристик исследуемых сталей 09Г2С и 30MnB5 на предельные нагрузки.

4. Исследованы механические характеристики сталей 09Г2С и 30MnB5 при испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб и циклическое нагружение. Приведены экспериментальные результаты определения механических характеристик при изменении числа циклов термоциклической обработки от 0 (состояние поставки) до 10. Для каждой характеристики материалов подобраны аппроксимационные зависимости, связывающие величину механической характеристики с числом циклов ТЦО. Коэффициент регрессии данных зависимостей имеет высокие значения – от 0,93 до 0,999. Расчетным путем с использованием данных по одноосному растяжению образцов оценены параметры износостойкости и трещиностойкости сталей 09Г2С и 30MnB5.

5. Для пределов текучести и прочности исследуемых сталей проведена проверка закона Холла – Петча. Близость корреляционных зависимостей к линейной функции (высокие значения коэффициента корреляции) говорит о том, что данная закономерность выполняется для сталей 09Г2С и 30MnB5. Распределение

микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. В зоне сварного шва превышение микротвердости над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – порядка 20÷30 единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше, чем стали 30MnB5.

6. Расчеты с использованием программных комплексов ANSYS и COMSOL Multiphysics[®] показали, что влияние пластичности исследуемых сталей сказывается на уровне $\sigma_{\text{экв}}$. Так, при расчетах компонентов НДС зуба в упруго-пластической постановке получается, что уровень максимальных эквивалентных напряжений практически в два раза ниже уровня, полученного при расчетах в упругой постановке. Наличие пластических деформаций сказывается на появлении изгиба незакрепленной части зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А; при этом для стали 30MnB5 уровень пластических деформаций (общих перемещений) оказывается ниже соответствующих показателей стали 09Г2С. Показано, что зуб из стали 30MnB5 по сравнению со сталью 09Г2С менее чувствителен к наличию в нем трещин.

7. Рассмотрены технический, надежностный и экономический аспекты возможности замены стали 09Г2С на сталь 30MnB5 для изготовления деталей ДСМ. Показано, что результаты расчетных оценок и экспериментов по всем трем направлениям говорят о возможности такой замены. При замене материала детали с 09Г2С на 30MnB5 наработка до отказа может быть увеличена в зависимости от количества термоциклов от 7 до 49 %.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИПД	интенсивная пластическая деформация
КВД	кручение под высоким давлением
КЭ	конечный элемент
НДС	напряженно-деформированное состояние
НС	напряженное состояние
РКУП	равноканальное угловое прессование
ТЦО	термоциклическая обработка
УДМ	ультрадисперсные материалы
$E_{сж}$	модуль упругости при сжатии
$E_{рас}$	модуль упругости при растяжении
σ_T	предел текучести
σ_b	предел прочности
$\sigma_{b\text{ рас}}$	временное сопротивление (предел прочности) при растяжении
$\sigma_{b\text{ ист}}$	истинный предел прочности
$\sigma_{b\text{ и}}$	предел прочности при изгибе
$\sigma_{0,2сж}$	условный предел текучести при сжатии
$\sigma_{0,2рас}$	условный предел текучести при растяжении
$\sigma_{0,2}$	условный предел текучести
δ	относительное удлинение после разрыва
ψ	относительное сужение поперечного сечения после разрыва

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scherbakov, A. Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling / A. Scherbakov, D. Monastyreva, V. Smirnov // E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019 [Дивноморское, 9–14 сентября 2019 года]. – Divnomorskoe Village: EDP Sciences, 2019. – P. 03022. – DOI 10.1051/e3sconf/201913503022.
2. Scherbakov, A. Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes / A. Scherbakov, A. Babanina, I. Kochetkov, P. Khoroshilov // E3S Web of Conferences: 13 [Ростов-на-Дону, 26–28 февраля 2020 года]. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 11005. – DOI 10.1051/e3sconf/202017511005.
3. Scherbakov, A. Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures / A. Scherbakov, A. Babanina, E. Solovyeva, M. Aleksandrovskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don [20–22 октября 2020 года]. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012012. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012012.
4. Щербаков, А. П. К оценке влияния воздействия коррозионной среды на надежность сварных металлоконструкций / В. Е. Гордиенко, Е. В. Трунова, Е. А. Корнеева, А. П. Щербаков // Архитектура – строительство – транспорт: Материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. В трех частях. [Санкт-Петербург, 04–06 октября 2017 года]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – С. 53–55.

5. Щербаков, А. П. К вопросу проведения предварительной обработки сварных заготовок из конструкционных сталей перед сваркой / В. Е. Гордиенко, А. П. Щербаков // Архитектура – строительство – транспорт: Материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета. В 2-х частях [Санкт-Петербург, 3–5 октября 2018 года]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 9–11.
6. Щербаков, А. П. Приспособление для точной и жесткой установки свариваемых заготовок / А. П. Щербаков, В. Е. Гордиенко // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых [Санкт-Петербург, 4–6 апреля 2018 года]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 116 – 120.
7. Щербаков, А. П. К выбору методов коррозионных испытаний изделий из конструкционных сталей с различной исходной структурой / А.П. Щербаков // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции [Пенза, 5 апреля 2020 года]. – Пенза: Наука и Просвещение, 2020. – С. 13–16.
8. Щербаков, А. П. Некоторые особенности проведения термической обработки металла до и после наплавки при ремонте деталей и изделий / А. П. Щербаков // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции [Пенза, 5 апреля 2020 года]. – Пенза: Наука и Просвещение, 2020. – С. 17–19.

9. Щербаков, А. П. К методике повышения прочностных свойств металла в различных зонах сварных соединений металлоконструкций строительных машин / А. П. Щербаков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 года]. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 3042–3044.
10. Щербаков, А. П. К выбору методов ускоренных коррозионных испытаний конструкционных сталей / А. П. Щербаков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 года]. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 3045–3051.
11. Щербаков, А. П. Влияние деформационного воздействия на магнитные свойства различных зон сварных соединений из конструкционной стали Ст3 / А. П. Щербаков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых [Белгород, 25–27 мая 2020 года]. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 3052–3056.
12. Щербаков, А. П. Механизация и автоматизация процессов монолитного домостроения с учетом проблем строительной робототехники / Ю. И. Тилинин, А. П. Щербаков // Технология и организация строительства: Материалы I Всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию основания кафедры «Строительное производство» [Санкт-Петербург, 14–15 мая 2020 года] / под общей редакцией А. Н. Гайдо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 407–417. – EDN STLESL.

13. Щербаков, А. П. К разработке методики проведения коррозионных испытаний сталей в различном структурном состоянии для строительных машин / А. П. Щербаков, А. А. Абросимова // Актуальные проблемы современного строительства: сборник научных трудов студентов, аспирантов и молодых учёных: [в 2 ч.]; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет – Ч. 2. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – С. 38–45.
14. Щербаков, А. П. Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций / А. П. Щербаков В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6(59). – С. 194–199.
15. Щербаков, А. П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, Е. В. Трунова, А. П. Щербаков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6(65). – С. 233–238. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-233-238.
16. Щербаков, А. П. К вопросу проведения коррозионных испытаний конструкционных сталей с различной исходной микроструктурой / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, А. П. Щербаков, Е. В. Трунова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6(71). – С. 142–148.
17. Щербаков, А. П. К вопросу влияния исходного состояния сварных заготовок на структуру и свойства сварных соединений / В. Е. Гордиенко, И. А. Иванов, А. А. Абросимова, А. П. Щербаков // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 4(69). – С. 150–155. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-150-155.

18. Щербаков, А. П. Влияние термической и термоциклической обработки на механические свойства конструкционных сталей / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, О. В. Кузьмин [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 1(66). – С. 128–133. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-128-133.
19. Щербаков, А. П. Оценка напряженно-деформированного состояния в зоне сварного соединения для рамы автопогрузчика / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, Н. Е. Манвелова // Известия МГТУ МАМИ. – 2020. – № 2(44). – С. 93–101. – DOI 10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101.
20. Щербаков, А. П. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, Н. Е. Манвелова // Недвижимость: экономика, управление. – 2020. – № 1. – С. 63–68.
21. Щербаков, А. П. Влияние эксплуатационных особенностей строительных машин на выбор материала конструкций рабочих механизмов / В. И. Новиков, А. Е. Пушкарев, А. П. Щербаков, О. В. Кузьмин // Металлообработка. – 2020. – № 2(116). – С. 24–30. – DOI 10.25960/mo.2020.2.24.
22. Щербаков, А. П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин / А. П. Щербаков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 4(74). – С. 464–475. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475.
23. Щербаков, А. П. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 6(76). – С. 664–675. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675.

24. Щербаков, А. П. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, Т. В. Виноградова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18. – № 2(78). – С. 180–190. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190.
25. Щербаков, А. П. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин / А. П. Щербаков, А. Е. Пушкарев, С. Е. Максимов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18. – № 6(82). – С. 646–661. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661.
26. Щербаков, А. П. К вопросу автоматизации процессов монолитного домостроения с учетом исследования конструкционных сталей в строительной робототехнике / С. А. Евтюков, Ю. И. Тилинин, А. П. Щербаков // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3(74). – С. 72–79. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-72-79. – EDN UKGAXZ.
27. Scherbakov, A. Materials and methods of experimental studies of welded metal structures of construction machines / A. Scherbakov, A. Babanina, E. Solovyeva, M. Aleksandrovskiy // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 130 LNCE. – P. 572–586. – DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_57.
28. Scherbakov, A. Passive probe-coil magnetic field test of stress-strain state for welded joints / A. Scherbakov, A. Babanina, A. Matusevich // Advances in Intelligent Systems and Computing [см. в книгах]. – 2021. – Vol. 1259 AISC. – P. 312–323. – DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_27.

29. Scherbakov, A. Acting stresses in structural steels during elastoplastic deformation / A. Scherbakov, A. Babanina, K. Graboviy // *Advances in Intelligent Systems and Computing* [см. в книгах]. – 2021. – Vol. 1259 AISC. – P. 298–311. – DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_26.
30. Scherbakov, A. The Impact of External Influences on the Characteristics of Metals of Welded Structures of Construction Machines / A. Scherbakov, A. Babanina, V. Breskich, V. Klyovan // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 247. – P. 973–982. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_88.
31. Scherbakov, A. Phased Passive Fluxgate Control of Structural Changes in Low-Carbon and Low-Alloy Steels of Construction Machines / A. Scherbakov, E. Kuzbagarova, A. Kuzbagarov, A. Babanina // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 247. – P. 143–157. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_15.
32. Scherbakov, A. Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments / A. Scherbakov, A. Sklyarova, A. Pushkarev, A. Petrov // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2022. – Vol. 247. – P. 557–573. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_50.
33. Scherbakov, A. The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes / A. Scherbakov, E. Lukashuk, A. Pushkarev, T. Vinogradova // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2022. – Vol. 247. – P. 539–555. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_49.
34. Куракина, Е. В. Строительные машины. Теория и практика: учебное пособие / Е. В. Куракина, А. П. Щербаков, Я. Д. Гончарова; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 240 с.

35. Пушкарев, А. Е. Определение и расчёт технологических, рабочих и эксплуатационных параметров инструментов и исполнительных механизмов дорожно-строительных машин: учебное пособие / А. Е. Пушкарёв, И. И. Воронцов, А. П. Щербаков, В. И. Новиков, А. А. Петров; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 236 с.
36. Гордиенко, В. Е. Основные способы сварки: учебное пособие / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, А. П. Щербаков, В. И. Новиков; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 88 с.
37. Щербаков, А. П. Пассивный феррозондовый контроль и расчет сварных металлоконструкций строительных машин с учетом кинетики развития коррозионных повреждений: монография / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, А. П. Щербаков, Е. В. Трунова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – 170 с. – ISBN 978-5-9227-0915-6.
38. Щербаков, А. П. Эффективность и надёжность процессов и технологий при эксплуатации наземных транспортно-технологических машин: монография / А. А. Складорова, А. П. Щербаков, Е. В. Куракина; под общ. ред. канд. техн. наук, доцента Е. В. Куракиной. – Санкт-Петербург: Петрополис, 2020. – 188 с.
39. Щербаков, А. П. Концентрат смазочно-охлаждающей жидкости на основе отходов масложирового производства для магнитно-абразивной обработки металлов / Н. Н. Романюк, Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, К. Л. Сергеев, С. А. Войнаш, А. П. Щербаков, В. А. Соколова, Е. Ю. Ремшев, К. Ю. Максимович // Пат. № 2769313, РФ, МПК С10М 165/00 (2006.01), С10М 173/02 (2006.01), С10М 129/40 (2006.01), С10М 125/14 (2006.01), С10М 133/08 (2006.01), С10М 159/08 (2006.01), С10N 40/20 (2006.01), заявитель и патенто-

обладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2021109196. Заявл. 02.04.2021, опубл. 30.03.2022. Бюл. № 10. – 8 с.: ил.

40. Ерохин, М. Н. Детали машин и основы конструирования / М. Н. Ерохин, А. В. Карп, В. А. Матвеев [и др.]. / под ред. М. Н. Ерохина. – М.: КолосС, 2005. – 462 с.
41. Дарков, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро // 4-е изд. – М.: Высшая школа, 1975. – 654 с.
42. Гольденблат, И. И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
43. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ: Основы теории разрушения грунтов, моделирование процессов, прогнозирование параметров / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 423 с.
44. Буряк, Е. С. Машины для строительства и содержания лесовозных дорог / Е. С. Буряк. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2013. – 202 с.
45. Бородачев, И. П. Справочник конструктора дорожных машин / С. А. Варганов, Б. Ф. Бондаков, М. Р. Гарбер [и др.]. / под ред. И. П. Бородачева. – М.: Машиностроение, 1973. – 504 с.
46. Горский, А. И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кореновский. – М.: ВНИИЛИТМАШ, 1974. – 80 с.

47. Карабасов, Ю. С. Новые материалы / В. Н. Анциферов, Ф. Ф. Бездудный, Л. Н. Белянчиков [и др.]. / под науч. ред. Ю. С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
48. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – М.: Химия, 2000. – 672 с.
49. Рыжонков, Д. И. Наноматериалы / Д. И. Рыжонков, В. В. Левина, Э. Л. Дзидзигури. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 365 с.
50. Физическое материаловедение [в 6 томах] / под общ. ред. Б. А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. Том 5. Материалы с заданными свойствами / М. И. Алымов, Г. Н. Елманов, Б. А. Калинин [и др.]. – М.: МИФИ, 2008. – 672 с.
51. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.
52. Гусев, А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях / А. И. Гусев // Успехи физических наук. – 1998. – Том 168. – № 1. – С. 55–83.
53. Valiev, R. Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov // Progress in Materials Science. – 2000. – № 45. – P. 103–189.
54. Малыгин, Г. А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов: Обзор / Г. А. Малыгин // Физика твердого тела. – 2007. – Том 49. – Вып. 6. – С. 961–982.
55. Кушнер, В. С. Материаловедение / В. С. Кушнер, А. С. Верещака, Д. А. Негров [и др.]; под ред. В. С. Кушнера. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 232 с.
56. Каблов, Е. Н. Материаловедение. Теория и технология термической обработки / Е. Н. Каблов, Г. Н. Гаврилов, В. Т. Ерофеев [и др.]; под ред. Е. Н. Каблова. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2019. – 281 с.

57. Козловский, А. Э. Термическая обработка углеродистых / А. Э. Козловский, М. Ю. Колобов. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2017. – 144 с.
58. Гимазов, А. А. Влияние энергии дефекта упаковки на структуру и микротвердость чистых ГЦК металлов, полученных комбинацией методов интенсивной пластической деформации / Азат Альбертович Гимазов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Уфа: 2014. – 118 с.
59. Хоменко, А. В. Физика прочности и пластичности / А. В. Хоменко, Я. А. Ляшенко, Л. С. Метлов. Металлофизические новейшие технологии. – 2008. – Том 30. – № 6. – С. 859–872.
60. Нанотехнология и обработка материалов давлением. [Электронный ресурс]. <https://extxe.com/11005/nanotehnologija-i-obrabotka-materialov-davleniem/>. [Заголовок с экрана].
61. Рыбальченко, О. В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические и служебные свойства стали 08X18H10T / Ольга Владиславовна Рыбальченко // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: 2014. – 167 с.
62. Рааб, Г. И. Перспективные методы ИПД для получения наноструктурированных металлических материалов / Г. И. Рааб, В. Г. Шibaков, А. Г. Рааб. Materials Physics and Mechanics. – 2016. – № 25. – С. 77–82.
63. Першина, Е. А. Влияние интенсивной пластической деформации на процессы кристаллизации и свойства аморфных сплавов на основе Al и Fe / Елена Андреевна Першина // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Черноголовка: 2017. – 160 с.

64. Маркушев, М. В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов / М. В. Маркушев. Письма о материалах. – 2011. – Том 1. – С. 36–42.
65. Утяшев, Ф. З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации / Ф. З. Утяшев. Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Том 20. – № 1. – С. 7–25.
66. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
67. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. – 64 с.
68. Хасанов, О. Л. Метод коллекторного компактирования нано- и полидисперсных порошков: учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, А. А. Качаев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 102 с.
69. Домбровский, Н. Г. Строительные машины / Н. Г. Домбровский, Ю. Л. Картвелишвили, М. И. Гальперин. – В двух частях. Часть 1. – М.: Машиностроение, 1976. – 391 с.
70. Вавилов, А. В. Дорожно-строительные машины / А. В. Вавилов, И. И. Леонovich, А. Н. Максименко, Л. С. Шкрадюк, А. М. Щемелев; под общ. ред. А. М. Щемелева. – Минск: Технопринт, 2000. – 515 с.
71. Алексеева, Т. В. Дорожные машины / Т. В. Алексеева, К. А. Артемьев, А. А. Бромберг и др. – В двух частях. Часть 1. Машины для земляных работ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 504 с.

72. Куклин, Н. Г. Детали машин / Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 383 с.
73. Плотников, П. Н. Детали машин: расчет и конструирование / П. Н. Плотников, Т. А. Недошивина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 236 с.
74. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – 12-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
75. Решетов, Д. Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
76. Ерохин, М. Н. Детали машин и основы конструирования / М. Н. Ерохин, А. В. Карп, Е. И. Соболев [и др.]; под ред. М. Н. Ерохина. – М.: КолосС, 2005. – 462 с.
77. Мощенок, В. И. Выбор материала и метода повышения износостойкости режущих элементов бульдозеров / В. И. Мощенок, В. П. Тарабанова, Н. А. Лалазарова // Вестник ХНАДУ. – 2007. – № 38. – С. 38–41.
78. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия термины и определения. Введен в действие 01.07.79. – М.: Стандартиформ, 2009. – 22 с.
79. Филиппов, М. А. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. – В 2 т. Т. I. Стали и чугуны / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев, М. М. Розенбаум. – 2-е изд., испр. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 232 с.
80. Добронравов, С. С. Строительные машины и основы автоматизации / С. С. Добронравов, В. Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
81. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

82. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 1 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1988. – 831 с.
83. Конев, В. В. Условия эксплуатации строительного-дорожных машин / В. В. Конев, Ш. М. Мерданов, Д. М. Бородин, Г. Г. Закирзаков, С. С. Мильденбергер // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2016. – № 12. – С. 502–507.
84. Чооду, О. А. Разработка методики оценки влияния климатических условий на эксплуатацию дорожно-строительных машин / Остап Андреевич Чооду. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: 2009. – 128 с.
85. Саранча, С. Ю. Комплексная оценка качества конструкционных сталей / С. Ю. Саранча, Д. А. Зайцев // Качество в обработке материалов. – 2015. – № 2(4). – С. 54–58.
86. Bai, D. Разработка на фирме «SSAB North America» сталей с высокими характеристиками для конструкции мостов / D. Bai, T. Nelson, R. Bondar [et al.]. // Новости чёрной металлургии за рубежом. – 2010. – № 6. – С. 67–70.
87. Меркушина, Е. А. Корреляционная зависимость потенциала питтингообразования и показателей PREN и MARC для аустенитных коррозионностойких сталей / Е. А. Меркушина, В. В. Березовская // Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» [Екатеринбург, 15–18 декабря 2014 года]. – 2015. – С. 355–358.
88. Бабенко, Э. Г. Расчет режимов электрической сварки и наплавки / Э. Г. Бабенко, Н. П. Казанова. – Хабаровск: 1999. – 54 с.
89. Трофимов, В. Н. Остаточные напряжения и критерий трещиностойкости / В. Н. Трофимов, В. В. Карманов, Ю. В. Панин // Качество в обработке материалов. – 2015. – № 2(4). – С. 33–40.

90. Третьяков, А. В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. – М.: Машиностроение, 1971. – 64 с.
91. Густов, Ю. И. Исследование взаимосвязи коэффициентов пластичности и предела текучести сталей стандартных категорий прочности / Ю. И. Густов, Х. Аллаттуф // Вестник МГСУ. – 2013. – № 7. – С. 22–26.
92. Сорокин, Г. М. Основы механического изнашивания сталей и сплавов: учебное пособие / Г. М. Сорокин, В. Н. Малышев. – М.: Логос, 2014. – 308 с.
93. Горский, А. И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кореновский. – М.: НИИМАШ, 1974. – 80 с.
94. Тылкин, М. А. Справочник термиста ремонтной службы / М. А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1981. – 80 с.
95. Федюкин, В. К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В. К. Федюкин, М. Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
96. Гурьев, А. М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин, Ю. П. Хараев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2 (ч. 2). – С. 36–43.
97. Шоршоров, М. Х. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / А. С. Тихонов, В. В. Белов, И. Г. Леушкин, В. И. Еременко, С. Ф. Забелин; под общ. ред. М. Х. Шоршорова. – М.: Наука, 1984. – 187 с.
98. Абросимова, А. А. Методика контроля и повышения прочности сварных соединений металлоконструкций строительных машин / Анжелика Анатольевна Абросимова // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2017. – 172 с.

99. Овчинников, Н. В. Методика оценки технического состояния сварных несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов / Николай Владимирович Овчинников // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: 2010. – 181 с.
100. Трение, изнашивание и смазка. – В 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алесина. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
101. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введен в действие 01.01.83. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 21 с.
102. ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892-84). Металлы. Метод испытаний на растяжение. Введен в действие 16.07.84. – М.: Стандартинформ, 2008. – 28 с.
103. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Введен в действие 01.07.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1980. – 27 с.
104. Wenyu, C. True stress-strain curves for ASTM A992 steel for fracture simulation at elevated temperatures / C. Wenyu, A. M. Mohammed, M. D. Engelhardt // Journal of Constructional Steel Research. – 2017. – Vol. 139. – Pp. 272–279.
105. Биргер, И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
106. Roylance, D. Stress-strain curves / David Roylance // Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139 [August 23, 2001]. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdf4pro.com/view/stress-strain-curves-saylor-academy-44ed51.html>. Дата обращения: 01.07.2022.

107. ГОСТ 14019–2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. Введен в действие 01.10.2004. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 11 с.
108. Бернштейн, М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
109. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. Введен в действие 01.01.81. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 27 с.
110. Мыльников, В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов / В. В. Мыльников // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. № 5. – С. 427–435.
111. Шалимов, М. П. Разработка технологии и порошковой проволоки для дуговой сварки высокопрочных легированных сталей / М. П. Шалимов, А. В. Безрезовский, А. С. Смоленцев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 2019. Т. 21. № 1. – С. 49–54.
112. Денисов, М. А. Автоматизированное проектирование в ANSYS и КОМПАС-3D / М. А. Денисов. – Екатеринбург: УрФу, 2015. – 264 с.
113. Верхотуркин, Е. Ю. Интерфейс и генерирование сетки в ANSYS Workbench / Е. Ю. Верхотуркин, В. Н. Пащенко, В. Б. Пясецкий. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. – 63 с.
114. Miehe, C. A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits / C. Miehe, M. Hofhacker, and F. Welschinger // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 2010. Vol. 199. – Pp. 2765–2778.

115. Structural Mechanics Module. User's Guide. [Электронный ресурс]. URL: www.comsol.com/trademarks. – 1602 p.
116. Солнцев, Ю. П. Хладостойкие стали и сплавы / Ю. П. Солнцев. – 3-е изд., стереотип. – СПб.: Химиздат, 2017. – 480 с.
117. Корзников, А. В. О предельных минимальных размерах зерен в наноструктурных металлических материалах, полученных при деформации кручением под давлением / А. В. Корзников, А. Н. Тюменцев, И. А. Дитенберг // Физическая мезомеханика. – 2006. – №9. – С. 71–74.
118. Файрушин, А. М. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва. Современные проблемы машиностроения / А. М. Файрушин, Д. В. Каретников, А. С. Романчук // Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции, Томск. 2017. – С. 50–58.
119. Zhiguo, Lu. Wear and Friction Characteristics of 65Mn Steel for Spike-Tooth Harrow / Zhiguo Lu, Chuanyu Du, Qingcai Chen, Tianying Niu, Na Wang and Wanli Song // Coatings. – 2021. – № 11. – 319. – Pp. 3–13.
120. García Sanchez, L. Comparative Life Cycle Analysis (LCA) Study on Two Wear-Resistant Boron Steels: RAEX450 and 30MnB5 / García L. Sanchez, Growene W. Queirós, José M. Gómez de Salazar and Antonio J. Criado // Journal of Material Sciences & Engineering. – 2020. – Vol. 9, Issue 2. – Pp. 1–3.
121. Queirós G. W. Improved Wear Resistance of Boron Steels by Subcritical Annealing and Hardening with Production Cost Savings and Lower Environmental Impact / Queirós G. W, García Sánchez L., Gómez de Salazar J. M. and Criado Portal A. J. // Journal of Material Sciences & Engineering. – 2018. – Vol. 7, Issue 1. – Pp. 1–4.

122. Серов, Н. В. Упрочнение плоских рабочих органов сельскохозяйственной техники электроконтактной пайкой металлической ленты / Никита Вячеславович Серов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2017. – 170 с.
123. Межецкий, Г. Д. Сопротивление материалов / Г. Д. Межецкий, Г. Г. Загребин, Н. Н. Решетник; под общ. ред. Г.Д. Межецкого, Г. Г. Загребина. – 5-е изд. – М., 2016. – 432 с.
124. Тутов, С. С. Исследование воздействия нагрузок на зуб ковша экскаватора / С.С. Тутов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 11. – С. 88–90.
125. Лекции по механике разрушения. [Электронный ресурс].
URL: [studmed.ru>view/lekcii-po-mehanike-razrusheniya](http://studmed.ru/view/lekcii-po-mehanike-razrusheniya).
126. Лукашенко, В. И. Вероятностные методы строительной механики и теория надежности строительных конструкций / В. И. Лукашенко. – Казань: Казанский гос. архитект.-строит. ун-т, 2016. – 244 с.
127. Шатов, М. М. Определение вероятности отказа, достижимой на основе регламентации запасов прочности / Михаил Михайлович Шатов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск, 2013. – 122 с.
128. Рекомендации Р 50-54-96-88. Надежность в технике. Методы оценки экономических последствий повышения надежности. – М.: ВНИИМАШ, 1989. – 40 с.
129. Ершова, И. В. Экономическая эффективность технических решений / С. Г. Баранчикова [и др.]; под общ. ред. проф. И. В. Ершовой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 140 с.

130. Ушаков, И. А. Надежность технических систем / Ю. К. Беляев [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
131. Викторова, В. С. О показателях надежности типа средняя наработка / В.С. Викторова, А. С. Степанянц // Надежность. – 2014. – № 4(51). – С. 27–36.
132. ГОСТ 27.410–87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. Введен в действие 01.01.89. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 114 с.
133. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. Введен в действие 01.01.92. – М.: Стандартиформ, 2007. – 20 с.
134. Репин, С. В. Расчетные модели обеспечения работоспособности и эффективности транспортно-технологических машин в эксплуатации / С. В. Репин, В. П. Чмиль, А. В. Зазыкин. – СПб.: СПбГАСУ, 2015. – 96 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 – Значения коэффициентов запаса прочности [41]

Вид нагружения	Условие прочности	Допускаемое напряжение	Примечание
1	2	3	4
Растяжение (сжатие)	Пластичные материалы: $\sigma \leq [\sigma]$. Хрупкие материалы: $\sigma_p \leq [\sigma_p]$; $\sigma_c \leq [\sigma_c]$	Пластичные материалы: $[\sigma] = \sigma_T / [n_T]$. Хрупкие материалы: $[\sigma] = [\sigma_p] = \sigma_{bp} / [n_b]$; $[\sigma] = [\sigma] [\sigma_c] = \sigma_{bc} / [n_b]$	σ – наибольшее по абсолютной величине расчетное растягивающее или сжимающее напряжение (при одинаковых пределах прочности на растяжение и сжатие); [σ] – допускаемое напряжение на растяжение или сжатие (при одинаковых пределах прочности на растяжение и сжатие); σ_p – наибольшее расчетное растягивающее напряжение; σ_c – наибольшее расчетное сжимающее напряжение; [σ_p] – допускаемое напряжение при растяжении (при неодинаковых пределах прочности на растяжение и сжатие); [σ_c] – допускаемое напряжение при сжатии (при неодинаковых пределах прочности на растяжение и сжатие); σ_T – предел текучести; σ_b – предел прочности; σ_{bp} – предел прочности на растяжение; σ_{bc} – предел прочности на сжатие; [n_T] – нормативный коэффициент запаса прочности по пределу текучести; [n_b] – нормативный коэффициент запаса прочности по пределу прочности
Сдвиг, срез, скалывание	$\tau \leq [\tau]$	$[\tau] = (0,6 \div 0,8) [\sigma]$	τ – расчетное напряжение по площадке сдвига; [τ] – допускаемое касательное напряжение на сдвиг
Смятие	$\sigma_{см} \leq [\sigma_{см}]$	$[\sigma_{см}] = (1,7 \div 2,0) [\sigma]$	–

Продолжение табл. А1

1	2	3	4
Кручение	$\tau_{\max} \leq [\tau]$	$[\tau] = \tau_{\text{пред}} / [n]$. Для стали принимают $[\tau] \approx 0,5 [\sigma]$	$\tau_{\text{пред}}$ – величина, равная пределу текучести при сдвиге τ_T для пластичных материалов и пределу прочности τ_b при сдвиге для хрупких материалов; $[n]$ – нормативный коэффициент запаса прочности
Изгиб	$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$; $\tau_{\max} \leq [\tau]$	Для стали принимают $[\tau] \approx 0,6 [\sigma]$	σ_{\max} – наибольшее нормальное напряжение в поперечном сечении; τ_{\max} – наибольшее касательное напряжение в поперечном сечении, где наибольшая поперечная сила
Продольный изгиб	$\sigma \leq [\sigma]$. Проверка устойчивости: $\sigma \leq [\sigma_y]$	$[\sigma] = \sigma_T / [n_T]$; $[\sigma_y] = \sigma_{\text{крит}} / [n_y] = \varphi [\sigma]$	$[n_y]$ – нормативный коэффициент запаса по устойчивости (зависит от материала и величины гибкости). Принимается бóльшим, чем запас прочности; $\sigma_{\text{крит}}$ – критическое напряжение сжатия; φ – коэффициент продольного изгиба (изменяется от 1 до 0,19 в зависимости от гибкости)
Продольно-поперечный изгиб	$\sigma_{\max} \leq \sigma_T$	Расчет проводится по нагрузке: $F_{\max} = F [n]$	F – действующая нагрузка; F_{\max} – максимальная (предельная) нагрузка
Динамическая нагрузка, удар	$\sigma_{\text{дин}} \leq [\sigma]$; $\sigma_{\text{дин}} = \sigma_{\text{стат}} k_{\text{дин}}$	Пластичные материалы: $[\sigma] = \sigma_T / [n_T]$. Хрупкие материалы: $[\sigma] = [\sigma_p] = \sigma_{b_p} / [n_b]$; $[\sigma] = [\sigma] [\sigma_c] = \sigma_{bc} / [n_b]$	$\sigma_{\text{дин}}$ – наибольшее динамическое напряжение; $\sigma_{\text{стат}}$ – наибольшее статическое напряжение; $k_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности

Окончание табл. А1

1	2	3	4
Переменные во времени напряжения:	–	–	–
– симметричный цикл изгиба	Расчет на выносливость или усталостную прочность: определение предела выносливости материала	Для стали принимают $\sigma_{-1 \text{ изг}} \approx 0,43\sigma_b$	σ_{-1} – предел выносливости материала
– симметричный цикл кручения		Для стали принимают $\tau_{-1} \approx 0,58\sigma_{-1 \text{ изг}}$	τ_{-1}, σ_{-1} – предел выносливости материала
– цикл центрального растяжения-сжатия	Определение предела выносливости детали	$\sigma_{-1 \text{ раст}} \approx (0,6 \div 0,9) \sigma_{-1 \text{ изг}}$; $\sigma_{-1 \text{ д}} = \sigma_{-1} / k_{\sigma \text{ д}}$; $\tau_{-1 \text{ д}} = \tau_{-1} / k_{\tau \text{ д}}$	$\sigma_{-1 \text{ д}}$ – предел выносливости детали; $k_{\sigma \text{ д}}$ – коэффициент снижения предела выносливости
– плоское <i>НС</i> (изгиб плюс кручение, растяжение плюс изгиб и т. д.)	Проверочный расчет на прочность: $n \geq [n_{\text{перем}}]$	$n = \sigma_{-1 \text{ д}} / \sigma_{\text{max}} = \sigma_{-1} / (\sigma_{\text{max}} k_{\sigma \text{ д}})$ – изгиб; $n = \sigma_{-1 \text{ д раст}} / \sigma_{\text{max}} = \sigma_{-1 \text{ раст}} / (\sigma_{\text{max}} k_{\sigma \text{ д}})$ – растяжение-сжатие; $n = \tau_{-1 \text{ д}} / \tau_{\text{max}} = \tau_{-1} / (\tau_{\text{max}} k_{\tau \text{ д}})$ – кручение; $1/n^2 = 1/(n_{\sigma})^2 + 1/n_{\tau}^2$	Проектный расчет проводят без учета переменности напряжения, по пониженным допускаемым напряжениям. $[n_{\text{перем}}] = (1,4 \div 3,0)$; n – общий коэффициент запаса прочности; n_{σ} – коэффициент запаса прочности по нормальным напряжениям; n_{τ} – коэффициент запаса прочности по касательным напряжениям

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

№ _____
 [Акт внедрения материалов диссертации
 в учебный процесс]



АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ)

в учебный процесс результатов диссертационной работы «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», аспирантом кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета **ЩЕРБАКОВЫМ Александром Павловичем**

Учебно-методическая комиссия АДФ в составе:

Председателя:

кандидата технических наук, доцента А.В. Зазыкина, декана «Автомобильно-дорожного факультета».

Секретаря:

кандидата технических наук, доцента Т.В. Виноградовой, доцента кафедры «Наземных транспортно-технологических машин».

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин» аспиранта кафедры «Наземных транспортно-технологических машин» Щербакова Александра Павловича (научный консультант: доктор технических наук, профессор Пушкарев Александр Евгеньевич), в учебный процесс выпускающей кафедры «Наземных транспортно-технологических машин» автомобильно-дорожного факультета, в рабочую программу дисциплины (модуля) «Строительные машины» направление подготовки/ специальность 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», направленность (профиль) / специализация образовательной программы «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование».

Внедрение результатов диссертационной работы обсуждено на

заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 20 февраля 2023 года (протокол № 4).

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойства для стали 09Г2С и 30MnB5 при термоциклической обработке и установлено, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, в то время как сталь 30MnB5 реагирует на дальнейшее проведение термоциклической обработки уменьшением среднего размера зерна вплоть до 10 цикла.

2. Экспериментально исследован комплекс физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе с размером зерна. Для стали 30MnB5 впервые получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволили оценить влияние числа циклов на такие параметры сталей 09Г2С и 30MnB5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.

В ходе выполнения научно-исследовательской (диссертационной) работы, опубликованы следующие учебно-методические пособия:

1. А. П. Щербаков. Основные способы сварки: учебное пособие / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, В. И. Новиков, А. П. Щербаков, Е. В. Трунова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 88 с.
2. А. П. Щербаков. Строительные машины. Теория и практика: учебное пособие / Е. В. Куракина, А. П. Щербаков, Я. Д. Гончарова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 240 с.
3. А. П. Щербаков. Определение и расчет технологических, рабочих и эксплуатационных параметров инструментов и исполнительных механизмов дорожно-строительных машин: учебное пособие / А. Е. Пушкарев, И. И. Воронцов, А. П. Щербаков, В. И. Новиков; А. А. Петров. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 236 с.

Председатель учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета, декан, к.т.н., доцент



А.В. Зазыкин

Секретарь:
к.т.н., доцент кафедры, наземных транспортно-технологических машин



Т.В. Виноградова



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет»
(СибАДИ)**

644080, Омская область, г. Омск, пр. Мира, корпус 1, д. 5

№ _____
[Внедрение материалов диссертации
в учебный процесс]



УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по образовательной
деятельности
В.Н. Кузнецова

_____ 2023 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы аспиранта
ЩЕРБАКОВА Александра Павловича по теме «Выбор и обоснование
параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-
строительных машин» в учебный процесс Сибирского государственного
автомобильно-дорожного университета (СибАДИ).

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, осуществляемый в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» созданных на основе результатов, полученных в ходе выполнения научно-исследовательской (диссертационной) работы, учебно-методических пособий:

- А. П. Щербаков. Основные способы сварки: учебное пособие / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, В. И. Новиков, А. П. Щербаков, Е. В. Трунова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 88 с.
- А. П. Щербаков. Строительные машины. Теория и практика: учебное пособие / Е. В. Куракина, А. П. Щербаков, Я. Д. Гончарова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 240 с.
- А. П. Щербаков. Определение и расчет технологических, рабочих и эксплуатационных параметров инструментов и исполнительных механизмов дорожно-строительных машин: учебное пособие / А. Е. Пушкарев, И. И. Воронцов, А. П. Щербаков, В. И. Новиков; А. А. Петров. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 236 с.

Указанные издания используются студентами, обучающимися по

направлению подготовки 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» и по специализации 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» при изучении дисциплин «Конструкция и теория наземных транспортно-технологических машин. Строительные и дорожные машины».

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Экспериментально исследован комплекс физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МnB5. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе с размером зерна. Для стали 30МnB5 впервые получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволили оценить влияние числа циклов на такие параметры сталей 09Г2С и 30МnB5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.
2. Выявлены закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойства для стали 09Г2С и 30МnB5 при термоциклической обработке и установлено, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, в то время как сталь 30МnB5 реагирует на дальнейшее проведение термоциклической обработки уменьшением среднего размера зерна вплоть до 10 цикла.

Использование результатов диссертационной (кандидатской) работы «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин» аспиранта кафедры НТТМ Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Щербакова А.П., для внедрения в учебный процесс обсуждено на заседании кафедры «Строительная, подъемно-транспортная и нефтегазовая техника» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» «20» января 2023 года (протокол №2).

Заведующий кафедрой
«Строительная, подъемно-транспортная
и нефтегазовая техника», к.т.н., доцент



А.Б. Летопольский



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84**

№ _____
[Внедрение материалов диссертации
в учебный процесс]



ПОДТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной работе
А. И. Колосов

_____ 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы аспиранта ЩЕРБАКОВА Александра Павловича по теме «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин» в учебный процесс Воронежского государственного технического университета

Результаты кандидатской диссертации «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», аспиранта кафедры «Наземных транспортно-технологических машин» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Щербакова Александра Павловича (научный консультант: д.т.н., профессор кафедры «Наземных транспортно-технологических машин», Пушкарев Александр Евгеньевич). В период с 20 мая 2022 года по 10 февраля 2023 года (протокол №5) внедрены в учебный процесс ВГТУ на основании решения кафедры «Строительной техники и инженерной механики имени профессора Н.А. Ульянова».

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, осуществляемый в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ) созданных на основе результатов, полученных в ходе выполнения научно-исследовательской (диссертационной) работы учебно-методических пособий:

1. А. П. Щербаков. Основные способы сварки: учебное пособие / В. Е. Гордиенко, А. А. Абросимова, В. И. Новиков, А. П. Щербаков, Е. В. Трунова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 88 с.
2. А. П. Щербаков. Строительные машины. Теория и практика: учебное пособие / Е. В. Куракина, А. П. Щербаков, Я. Д. Гончарова. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 240 с.
3. А. П. Щербаков. Определение и расчет технологических, рабочих и эксплуатационных параметров инструментов и исполнительных

механизмов дорожно-строительных машин: учебное пособие / А. Е. Пушкарев, И. И. Воронцов, А. П. Щербаков, В. И. Новиков; А. А. Петров. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 236 с.

Указанные издания используются студентами, обучающимися по специализации 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» при изучении дисциплин «Строительные машины и оборудование», «Дорожные машины».

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойства для стали 09Г2С и 30MnB5 при термоциклической обработке и установлено, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, в то время как сталь 30MnB5 реагирует на дальнейшее проведение термоциклической обработки уменьшением среднего размера зерна вплоть до 10 цикла.

2. Экспериментально исследован комплекс физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе с размером зерна. Для стали 30MnB5 впервые получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволили оценить влияние числа циклов на такие параметры сталей 09Г2С и 30MnB5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.

Начальник учебно-методического
управления

Л.П. Мышовская

Декан «Дорожно-транспортного» факультета

В.Л. Тюнин

Заведующий кафедрой
«Строительной техники и инженерной
механики имени профессора Н.А. Ульянова»

В.А. Жулай



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» – ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД»**

192012, Россия, Санкт-Петербург, вил.тер.г. муниципальный округ Рыбацкое, пр-кт Обуховской Обороны, д. 120, стр. 19, помещ. 1-Н, №708
тел.: (812) 363-93-40, тел./факс: (812) 363-98-11, e-mail: dou@goz.ru
ОКПО 07513234, ОГРН 1037825058732, ИНН/КПП 7811144648/785050001

10.03.2023 № 7097/041
На № _____ от _____

АКТ

**О внедрении результатов диссертационного исследования
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин»**

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

Результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности АО «Обуховский завод», наиболее существенными из которых являются:

1. Исследована зависимость размеров зерна от количества термоциклов с дальнейшим экспериментальным исследованием комплекса физико-механических и физических характеристик изучаемых сталей.
2. Получены новые научные результаты, реализованные в виде математических соотношений, позволяющие оценить различные аспекты повышения долговечности дорожно-строительных машин (прочность, надежность, износостойкость и т.д.) при их эксплуатации за счет обоснованного выбора материала рабочих органов.
3. Рассмотрены характеристики как сталей 09Г2С и 30МпВ5, так и однородных стыковых сварных соединений на их основе.
4. Исследования построены на экспериментальном изучении изменчивости комплекса физико-механических и физических характеристик сталей и теоретическом анализе влияния этих изменений на работоспособность дорожно-строительных машин при их эксплуатации.
5. Также были использованы: математическое моделирование, теоретические подходы обеспечения прочности, надежности и долговечности дорожно-строительных машин, а также методы математической статистики.

В целом, использование результатов диссертационной работы А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин. Полученные результаты могут быть использованы при внедрении в производство.

Первый заместитель генерального директора-
технический директор



В.В. Шафранский

013595



УРАЛМАШЗАВОД

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»

620012, Россия, Екатеринбург, пл. Первой пятилетки, тел. +7(343) 336-68-38, тел./факс: +7(343) 336-60-40,
e-mail: mail@uralmash.ru, ОГРН 1026605620689, ИНН/КПП 6663005798/668601001
Pervoy pyatiletki pl., Ekaterinburg, Russia, 620012, tel.: +7(343) 336-68-38, tel./fax: +7(343) 336-60-40,
e-mail: mail@uralmash.ru

№ _____
На № _____ от _____

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

АКТ

об использовании и внедрении на ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения»
результатов, содержащихся в диссертационной работе и научных публикациях
ЩЕРБАКОВА Александра Павловича

Результаты диссертационной работы А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы и внедрены в практической деятельности ПАО «Уральский завод тяжелого машиностроения». Наиболее важными из результатов диссертационной работы для практической деятельности завода являются:

1. Выявленные закономерности уменьшения размера зерна и прочностных свойства для стали 09Г2С и 30МпВ5 при термоциклической обработке с установлением того факта, что для стали 09Г2С процесс стабилизируется на четвертом цикле, для стали 30МпВ5 дальнейшее проведение термоциклической обработки приводит к уменьшению среднего размера зерна вплоть до 10 цикла.
2. Определены зависимости, описывающие связь механических характеристик сталей при растяжении, сжатии и изгибе с размером зерна. Для стали 30МпВ5 получены механические характеристики (пределы прочности и текучести при растяжении, предел текучести при сжатии и прочность при изгибе) при различных количествах циклов термоциклической обработки. Данные сведения позволяют оценить влияние числа циклов на такие параметры сталей 09Г2С и 30МпВ5, как предел выносливости, износостойкость и коэффициент интенсивности напряжений.

В этой связи наше предприятие выражает признательность А.П. Щербакову за любезно предоставленные в наше распоряжение результаты своего диссертационного исследования.

С уважением,
Генеральный директор



Я. В. Центрер

АО «КОНЦЕРН ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»



«Московский машиностроительный завод
«АВАНГАРД»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д.33
Тел.: +7(495) 450-97-55, +7(495) 450-96-77, Факс: +7(495) 450-11-47
ОКПО: 07512111 ОГРН: 1027743012890 ИНН 7743065177 КПП 774301001

№ _____
На № _____ от _____

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования соискателя
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного
архитектурно-строительного университета»
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов
рабочих органов дорожно-строительных машин»
ЩЕРБАКОВА Александр Павловича

Результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности (АО «Московский машиностроительный завод «Авангард») в виде:

1. Экспериментально исследованного комплекса физико-механических и физических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. Для стали 30MnB5 многие характеристики получены впервые.
2. Определенных закономерностей влияния микроструктуры на прочностные свойства материала дорожно-строительных машин.
3. Оценки эффективности термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 и их однородных сварных соединений элементов конструкции дорожно-строительных машин; проведенной с целью измельчения микроструктуры.
4. Проведенного анализа влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин.
5. Повышения надежности дорожно-строительных машин путем замены материала рабочего органа.

В целом, использование результатов диссертационной работы А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин.

Генеральный директор



Д.В. Попков



**Общество с ограниченной ответственностью
«СПБГАСУ-Дорсервис»**

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

АКТ

О внедрении результатов исследования, полученных в диссертации А.П. Щербакова
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов
дорожно-строительных машин»

Результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности ООО «СПБГАСУ-Дорсервис» в виде:

1. Оценки эффективности термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 и их однородных сварных соединений элементов конструкции дорожно-строительных машин; проведенной с целью измельчения микроструктуры.
2. Определенных закономерностей влияния микроструктуры на прочностные свойства материала дорожно-строительных машин.
3. Экспериментально исследованного комплекса физико-механических и физических характеристик сталей 09Г2С и 30MnB5. Для стали 30MnB5 многие характеристики получены впервые.
4. Проведенного анализа влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин.
5. Повышения надежности дорожно-строительных машин путем замены материала рабочего органа.

В целом, использование результатов диссертационной работы А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин.

Генеральный директор
ООО «СПБГАСУ-Дорсервис»
К.э.н., доцент



Медрес Е.Е.

Группа компаний «ФОРСАЖ»



Общество с Ограниченной Ответственностью «МАРКА»

Адрес: 194356, город Санкт-Петербург, ул Хошимина, д. 1 литера А, помещ. 1-н помещ. 82, тел./факс: +7 (812) 456-05-65

ОГРН 1147847272496, ИНН 7810377745, КПП 780201001, БИК 044525389 р/с 4070281060000056786

ф-л Московский №3 ПАО «БАНК "ФК Открытие"» к/с 30101810845374525389

Исх.номер

06/03 от «06» марта 2023 г.

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

АКТ

О внедрении результатов диссертационного исследования
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов
дорожно-строительных машин»
А.П. Щербакова

Настоящий акт подтверждает, что полученные результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин» применяются в Обществе с ограниченной ответственностью «Марка», которые можно разделить на несколько пунктов, а именно:

1. На основании приведенного примера расчета прочности зуба ковша фронтального погрузчика BOVCAT S130 показано, что в качестве критерия прочности выступает величина предела текучести или предела прочности материала зуба. Приведены рекомендуемые значения коэффициентов запаса прочности для различных видов нагружения деталей. Показано, что действующие напряжения необходимо сравнивать с допускаемыми напряжениями, величины которых связаны с пределами текучести и прочности на растяжение.
2. Рассмотрены различные методы повышения прочностных характеристик сталей. Среди них термическая обработка, методы интенсивной пластической деформации (РКУП и КВД), поверхностная обработка и методы порошковой металлургии. Описано поведение физико-механических характеристик материалов в зависимости от размеров зерна. Показано, что увеличение предела текучести и твердости материала подчиняются закону Холла-Петча.

Телефон / факс: +7 (812) 456-05-65

Группа компаний «ФОРСАЖ»

ФОРСАЖ

Общество с Ограниченной Ответственностью «МАРКА»

Адрес: 194356, город Санкт-Петербург, ул Хошимина, д. 1 литера А, помещ. 1-н помещ. 82, тел./факс: +7 (812) 456-05-65

ОГРН 1147847272495, ИНН 7810377745, КПП 780201001, БИК 044525389 р/с 40702810600000056786

Ф-л Московский №3 ПАО «БАНК "ФК Открытие"» к/с 30101810845374525389

3. В качестве объектов исследований выбраны две стали – 09Г2С и 30МпВ5. Первая из них имеет широкое применение для изготовления для различных деталей дорожно-строительных машин, вторая рассматривается в качестве замены с целью повышения эффективности работы деталей и узлов дорожно-строительных машин. В качестве упрочняющей обработки данных сталей используется ТЦО, приводящая к измельчению микроструктуры сталей.
4. Проведены экспериментальные исследования различных характеристик сталей 09Г2С и 30МпВ5. Показано, что по всем исследованным характеристикам сталь 30МпВ5 превосходит сталь 09Г2С. Предложено для двухосного напряженного состояния использовать критерий энергии формоизменения, предельная кривая для которого имеет форму эллипса. Для выполнения требований надежности по данным проведенных экспериментов достаточно различие пределов текучести и прочности разных сталей в 1,2 раза.

В целом, использование результатов диссертационного исследования А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин. Полученные результаты могут быть использованы при внедрении в производство.



Генеральный директор

Кузьмин О.В.

Телефон / факс: +7 (812) 456-05-65

Акционерное общество
Государственная компания



СЕВЕРАВТОДОР

№ _____
На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор филиала №5
АО «ГК «Северавтодор»

И.Н. Кравец

_____ г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

материалов кандидатской диссертации аспиранта
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного
архитектурно-строительного университета»
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов
рабочих органов дорожно-строительных машин»
ЩЕРБАКОВА Александра Павловича

Результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности (АО «ГК «Северавтодор»), наиболее существенными из которых являются:

1. Исследования построены на экспериментальном изучении изменчивости комплекса физико-механических и физических характеристик сталей и теоретическом анализе влияния этих изменений на работоспособность дорожно-строительных машин при их эксплуатации.
2. Получены новые научные результаты, реализованные в виде математических соотношений, позволяющие оценить различные аспекты повышения долговечности дорожно-строительных машин (прочность, надежность,

www.severavtodor.ru
www.severznak.ru
www.ugra-most.ru



628422 Российская Федерация, г. Сургут,
ул. Промышленная 5
Телефон: +7 (3462) 22-51-72,
Факс +7 (3462) 22-51-82
E-mail: gp@severavtodor.ru

Акционерное общество
Государственная компания



СЕВЕРАВТОДОР

износостойкость и т.д.) при их эксплуатации за счет обоснованного выбора материала рабочих органов.

3. Рассмотрены характеристики как сталей 09Г2С и 30МпВ5, так и однородных стыковых сварных соединений на их основе.
4. Исследована зависимость размеров зерна от количества термоциклов с дальнейшим экспериментальным исследованием комплекса физико-механических и физических характеристик изучаемых сталей.
5. Также были использованы: математическое моделирование, теоретические подходы обеспечения прочности, надежности и долговечности дорожно-строительных машин, а также методы математической статистики.

Таким образом, использование результатов диссертационной (научно-исследовательской) работы А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин. Полученные результаты могут быть использованы при внедрении в производство.

Главный инженер филиала № 5
АО «ГК «Северавтодор»

_____ М.В. Абрамов



ООО «Завод «Дорожных машин»
152900, Россия, Ярославская обл.
г. Рыбинск, ул. Пилюставная, 12
тел./факс (4855) 26-37-14, 28-79-76
E-mail: dm@dormashina.ru

www.dormashina.ru

ИНН 7610083441
КПП 761001001

р.с. 40702810477190005149
к.с. 30101810500000000670

БИК 047888670 ОГРН 1097610001147
Северный банк ПАО Сбербанк г. Ярославль

Исх. № _____ от «___» _____ 2022 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «Завод дорожных машин»
_____ П.А. Кузнецов
_____ Г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета»,
«Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов
рабочих органов дорожно-строительных машин»
ЩЕРБАКОВА Александра Павловича

Настоящий акт подтверждает, что полученные результаты диссертационного исследования А.П. Щербакова на тему «Выбор и обоснование параметров конструкции и свойств материалов рабочих органов дорожно-строительных машин» применяются в Обществе с ограниченной ответственностью «Завод дорожных машин», которые можно разделить на несколько пунктов, а именно:

1. В качестве объектов исследований выбраны две стали – 09Г2С и 30МпВ5. Первая из них имеет широкое применение для изготовления для различных деталей дорожно-строительных машин, вторая рассматривается в качестве замены с целью повышения эффективности работы деталей и узлов дорожно-строительных машин. В качестве упрочняющей обработки данных сталей используется ТЦО, приводящая к измельчению микроструктуры сталей.
2. Рассмотрены различные методы повышения прочностных характеристик сталей. Среди них термическая обработка, методы интенсивной пластической деформации (РКУП и КВД), поверхностная обработка и методы порошковой металлургии. Описано поведение физико-механических характеристик материалов в зависимости от размеров зерна. Показано, что увеличение предела текучести и твердости материала подчиняются закону Холла-Петча.

3. На основании приведенного примера расчета прочности зуба ковша экскаватора ЭКГ-5А показано, что в качестве критерия прочности выступает величина предела текучести или предела прочности материала зуба. Приведены рекомендуемые значения коэффициентов запаса прочности для различных видов нагружения деталей. Показано, что действующие напряжения необходимо сравнивать с допускаемыми напряжениями, величины которых связаны с пределами текучести и прочности на растяжение.
4. Проведены экспериментальные исследования различных характеристик сталей 09Г2С и 30МпВ5. Показано, что по всем исследованным характеристикам сталь 30МпВ5 превосходит сталь 09Г2С. Предложено для двухосного напряженного состояния использовать критерий энергии формоизменения, предельная кривая для которого имеет форму эллипса. Для выполнения требований надежности по данным проведенных экспериментов достаточно различие пределов текучести и прочности разных сталей в 1,2 раза.

В итоге, использование результатов диссертационного исследования А.П. Щербакова, позволило повысить надежность и безопасность эксплуатации дорожно-строительных машин.

Главный инженер

Начальник производственного отдела



С.В. Дурягин

В.П. Солдатов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2769313

**КОНЦЕНТРАТ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ
НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МАСЛОЖИРОВОГО
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет" (RU)*

Авторы: *Романюк Николай Николаевич (BY), Акулович Леонид Михайлович (BY), Сергеев Леонид Ефимович (BY), Сергеев Кирилл Леонидович (BY), Войнаш Сергей Александрович (RU), Щербаков Александр Павлович (RU), Соколова Виктория Александровна (RU), Ремшев Евгений Юрьевич (RU), Максимович Кирилл Юрьевич (RU)*

Заявка № **2021109196**

Приоритет изобретения **02 апреля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **30 марта 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **02 апреля 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14e4010a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 769 313** (13) **C1**

(51) МПК
C10M 165/00 (2006.01)
C10M 173/02 (2006.01)
C10M 129/40 (2006.01)
C10M 125/14 (2006.01)
C10M 133/08 (2006.01)
C10M 159/08 (2006.01)
C10N 40/20 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

C10M 165/00 (2021.08); C10M 173/02 (2021.08); C10M 129/40 (2021.08); C10M 125/14 (2021.08); C10M 133/08 (2021.08); C10M 159/08 (2021.08); C10N 2040/20 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021109196, 02.04.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.04.2021

Дата регистрации:
30.03.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.04.2021

(45) Опубликовано: 30.03.2022 Бюл. № 10

Адрес для переписки:

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я
Красноармейская, 4, ФГБОУ ВО "СПбГАСУ",
Служба интеллектуальной собственности
управления научной работы

(72) Автор(ы):

Романюк Николай Николаевич (BY),
Акулович Леонид Михайлович (BY),
Сергеев Леонид Ефимович (BY),
Сергеев Кирилл Леонидович (BY),
Войнаш Сергей Александрович (RU),
Щербаков Александр Павлович (RU),
Соколова Виктория Александровна (RU),
Ремшев Евгений Юрьевич (RU),
Максимович Кирилл Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
государственный
архитектурно-строительный университет"
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2050408 C1, 20.12.1995. RU
94019406 A1, 10.01.1996. RU 1383779 C,
09.07.1995. RU 2228950 C2, 20.05.2004. RU
2368651 C1, 27.09.2009. CN 111171945 A,
19.05.2020. JP 4916462 B2, 11.04.2012. US 2625509
A1, 13.01.1953.

(54) КОНЦЕНТРАТ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ
МАСЛОЖИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к производству
смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и их
концентратам, используемых при механической
обработке металлов, а именно для магнитно-
абразивной обработки, и может быть
использовано в различных отраслях
промышленности. Концентрат смазочно-
охлаждающих жидкостей содержит
триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты,
гидроокись калия и полиметилсилоксановую
жидкость, а в качестве отходов масложирового

производства используют смесь жировых
гудронов и соапстоки растительных, мас. %:
отходы масложирового производства 30,0-40,0;
триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты
5,0-7,0; гидроокись калия 2,0-3,0;
полиметилсилоксановая жидкость 0,1 -0,2; вода
49,8-62,9. Технический результат – повышение
производительности при магнитно-абразивной
обработке при одновременном снижении
шероховатости обрабатываемых поверхностей
путем улучшения эксплуатационных

RU 2 769 313 C1

RU 2 769 313 C1

характеристик заявляемого концентрата. 3 табл., 3 пр.

R U 2 7 6 9 3 1 3 C 1

R U 2 7 6 9 3 1 3 C 1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(19) **RU** (11) **2 769 313**⁽¹³⁾ **C1**(51) Int. Cl.
C10M 165/00 (2006.01)
C10M 173/02 (2006.01)
C10M 129/40 (2006.01)
C10M 125/14 (2006.01)
C10M 133/08 (2006.01)
C10M 159/08 (2006.01)
C10N 40/20 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

C10M 165/00 (2021.08); *C10M 173/02* (2021.08); *C10M 129/40* (2021.08); *C10M 125/14* (2021.08); *C10M 133/08* (2021.08); *C10M 159/08* (2021.08); *C10N 2040/20* (2021.08)

(21)(22) Application: 2021109196, 02.04.2021

(24) Effective date for property rights:
02.04.2021Registration date:
30.03.2022

Priority:

(22) Date of filing: 02.04.2021

(45) Date of publication: 30.03.2022 Bull. № 10

Mail address:

190005, Sankt-Peterburg, ul. 2-ya
Krasnoarmejskaya, 4, FGBOU VO "SPbGASU",
Sluzhba intellektualnoj sobstvennosti upravleniya
nauchnoj raboty

(72) Inventor(s):

Romanyuk Nikolaj Nikolaevich (BY),
Akulovich Leonid Mikhajlovich (BY),
Sergeev Leonid Efimovich (BY),
Sergeev Kirill Leonidovich (BY),
Vojnash Sergej Aleksandrovich (RU),
Shcherbakov Aleksandr Pavlovich (RU),
Sokolova Viktoriya Aleksandrovna (RU),
Remshev Evgenij Yurevich (RU),
Maksimovich Kirill Yurevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij
gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitelnyj
universitet" (RU)(54) **CONCENTRATE OF LUBRICANT-COOLANT LIQUID BASED ON OIL AND FAT PRODUCTION
WASTES FOR MAGNETIC-ABRASIVE PROCESSING OF METALS**

(57) Abstract:

FIELD: chemistry.

SUBSTANCE: invention relates to production of
lubricant-cooling liquids (LCL) and their concentrates
used in mechanical processing of metals, namely for
magnetic-abrasive processing, and can be used in
various industries. Lubricant-coolant concentrate
contains triethanolamine soap of oleic acid, potassium
hydroxide and polymethylsiloxane liquid, and oil and
fat production wastes used are a mixture of fatty tar andvegetable soap stocks, wt. %: oil and fat production
wastes 30.0–40.0; triethanolamine soap of oleic acid
5.0–7.0; potassium hydroxide 2.0–3.0;
polymethylsiloxane liquid 0.1–0.2; water 49.8–62.9.EFFECT: increase in productivity during magnetic-
abrasive processing with simultaneous reduction of
roughness of treated surfaces by improving operational
characteristics of the claimed concentrate.

1 cl, 3 tbl, 3 ex

RU 2 769 313 C 1

RU 2 769 313 C 1

Изобретение относится к производству смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и их концентратам, используемых при механической обработке металлов, а именно для магнитно-абразивной обработки, и может быть использовано в различных отраслях промышленности. Изобретение характеризуется доступностью исходных материалов, простотой технологического процесса изготовления и эффективностью использования.

Известен концентрат СОЖ для механической обработки металлов, содержащий, мас. %: минеральное масло 20-35; продукт реакции триэтаноламина с ненасыщенной жирной кислотой борная кислота 3-6; триэтаноламин 10-18; бис-(алкилполиоксиэтилена)-фосфат 9-16 и воду (см. патент РФ №1383779, С10М 173/00).

Недостатком известного концентрата СОЖ является то, что содержащийся в большом количестве триэтаноламин ухудшает экологические свойства СОЖ и вызывает коррозию обрабатываемого металла.

Известен концентрат СОЖ для обработки металлов резанием и давлением, содержащий, мас. %: соапсток светлых растительных масел 10-30; продукт нейтрализации кубового остатка от дистилляции жирных кислот, полученных из светлых растительных масел 10-30 и воду (см. заявка РФ №94019406, С10М 173/02).

Недостатком известного концентрата СОЖ является то, что в конечном продукте в составе присутствуют только жидкие компоненты, которые малоэффективны при обработке металлов резанием.

Наиболее близким аналогом к заявленному изобретению является концентрат защитного смазочного материала, использующийся при обработках металлов резанием на операциях шлифования и хонингования, содержащий, мас. %: триэтаноламин 0,5-5,0; диоксаноxy спирты 1-5; борные эфиры диоксаноxy спиртов 20-30; соапстоки растительных масел и животных жиров 10-20; продукт взаимодействия триэтаноламина с моноалкил-С₁₀-С₂₀ фосфорной и/или диалкил-С₈-С₁₀ фосфорной кислотами и с моноэфиром малеиновой кислоты или продукт взаимодействия триэтаноламина с диалкилдитиофосфорной кислотой или ее цинковой солью или с дибензил- или алкенилянтарным ангидридом, или продукт взаимодействия триэтаноламина с оксиэтилендифосфоxy кислотой и сульфатом цинка 2-20; целевая добавка: бактерицид, краситель, отдушка не более 4,5 и воду (см. патент РФ №2050408, С10М 173/02).

Недостатком данного концентрата является то, что он при достаточно высоких эксплуатационных характеристиках не стабилен в присутствии воды и это сказывается на ухудшении ингибирующих свойств. Кроме того, концентрат имеет сложный состав, который приводит к большому разбросу его физико-химических свойств.

Техническая проблема известных технических решений заключается в невысокой эффективности СОЖ при обработке материалов в виду сниженных эксплуатационных и экологических характеристик. Большинство концентратов изготавливают из нефтяного сырья, которое способствует увеличению экологической нагрузки на окружающую среду. Это требует разработки и создания новых составов концентратов на основе биологического продукта, в том числе отходов масложирового производства.

Сущность заявляемого изобретения заключается в том, что концентрат смазочно-охлаждающей жидкости для магнитно-абразивной обработки включает отходы масложирового производства, триэтаноламин, гидроксид калия, полиметилсилоксановую жидкость и воду. В качестве триэтаноламина используют триэтаноламиноxy мыло олеиновой кислоты, а в качестве отходов масложирового производства могут использовать жировые гудроны, либо смесь жировых гудронов и соапстоки растительных масел и жиров, мас. %:

RU 2 769 313 C1

отходы масложирового производства	30,0-40,0
триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты	5,0-7,0
гидроокись калия	2,0-3,0
полиметилсилоксановая жидкость	0,1-0,2
вода	49,8-62,9

- 5 Технический результат, достигаемый заявляемым изобретением, заключается в повышении производительности при магнитно-абразивной обработке при одновременном снижении шероховатости обрабатываемых поверхностей путем улучшения эксплуатационных характеристик заявляемого концентрата.
- 10 Жировой гудрон представляет собой кубовый остаток дистилляции жирных кислот из продукта гидролиза растительных масел, состоящий из смеси предельных и непредельных жирных и оксигирных кислот ряда $C_{10}-C_{24}$, а также содержит их сложные эфиры. Жировые гудроны обладают хорошими смазывающими и ингибирующими свойствами по отношению к металлам. При получении СОЖ, для перевода гудрона в водорастворимое состояние, его предварительно омыляют водным раствором щелочи.
- 15 Основная часть жирных кислот, в процессе омыления переходит в натриевые мыла, хорошо растворима в воде, но вместе с тем в составе омыленного гудрона всегда присутствуют неомыленные свободные жирные кислоты, определяющие высокие экранирующие и смазывающие свойства таких СОЖ. Соапстоки растительных масел и жиров представляют собой побочный продукт производства маргарина, образующийся при рафинировании подсолнечного, рапсового, соевого и животных жиров соответствующих саломасов. Триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты является высокоэффективным смачивателем и обеспечивает повышенное обезжиривание
- 20 металлических поверхностей. Гидроокись калия играет роль щелочного агента. Полиметилсилоксановая жидкость обеспечивает низкую устойчивость пены, что улучшает эксплуатационные свойства жидкости. Предложенное соотношение компонентов концентрата позволяет получить продукт с более высокими эксплуатационными качествами, наименьшими затратами на приобретение исходного сырья в связи с удорожанием нефти и повышенными экологическими свойствами.
- 25 Приготовление концентрата исследуемого СОЖ осуществляется следующим образом. В аппарат с механической мешалкой и подогревом вводится рассчитанное количество неомыленных отходов масложирового производства, таких как, например, соапстоков растительных масел, либо жировых гудронов, либо их смеси, которых при постоянном перемешивании нагревают до $50-60^{\circ}\text{C}$. Затем в полученную смесь добавляют 10%-ней водный раствор гидроокиси калия и выдерживают при температуре $110-120^{\circ}\text{C}$ в течение
- 35 1,5-2 часов, осуществляя реакцию омыления. Реакционную массу разбавляют горячей водой до требуемой концентрации, охлаждают до $70-80^{\circ}\text{C}$ и через 10-15 мин при постоянном перемешивании вводят триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты и полиметилсилоксановую жидкость до получения готового продукта. Концентрат СОЖ легко растворим в воде с образованием стабильных растворов. Рабочие растворы
- 40 обладают высокими моющими и антикоррозионными свойствами, а также умеренным пенообразованием. Физико-химические свойства указывают на высокую стабильность раствора. Для магнитно-абразивной обработки металлов использовали 3%-ней раствор концентрата в воде.
- 45 Для сравнительных испытаний приготовили составы концентратов СОЖ, химические составы и физико-механические свойства которых представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Компонент	Содержание в составе СОЖ, мас. %			
	Прототип	Состав I	Состав II	Состав III
Отходы масложирового производства	20	30	35	40
Триэтаноламин	2	5	6	7
Диоксановые спирты	1	-	-	-
Борные эфиры диоксановых спиртов	30	-	-	-
Продукт взаимодействия ДАФ	20	-	-	-
Гидроокись калия	-	2	2,5	3
Полиметилсилоксановая жидкость	-	0,1	0,15	0,2
Бактерицидные добавки, краситель, отдушка	2	-	-	-
Вода	25	62,9	56,35	49,8

Таблица 2.

Показатель	Прототип	Состав I	Состав II	Состав III
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт	51,7	38,1	39,5	40,2
Запах	слабый, специфический	слабый, специфический	слабый, специфический	слабый, специфический
Стабильность при хранении	выдерживает	выдерживает	выдерживает	выдерживает
рН 3 %-ого раствора	8,8-9,1	8,5-9,0	8,1-8,7	8,4-8,8
Склонность к пенообразованию, см ³	до 500	до 350	до 380	до 380
Устойчивость пенообразования, см ²	до 160	до 150	до 150	до 145
Плотность, г/м ³	1250	1010	1020	1050

Сравнительные испытания предлагаемых и известного концентрата СОЖ проводились на установке, оснащенной специальной наладкой и полюсными наконечниками, созданной на базе токарного станка ТВ-4. Обработывались поршневые пальцы с размерами D×d×l=25×16×66 мм, материал - сталь 45 ГОСТ 1050-88. Режимы и параметры процесса магнитно-абразивной обработки: величина магнитной индукции в рабочем зазоре, 0,8 Тл, скорость вращения детали, 40 м/мин, амплитуда осцилляции, 1 мм, величина рабочего зазора, 1 мм, время обработки, 45 с. В качестве ферроабразивного порошка применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, зернистость

RU 2769313 C1

которого 200-315 мкм. Исходная шероховатость поверхностей до обработки 1,3-1,4 мкм. В процессе испытаний оценивали удельный массовый съём металла (ΔG) и шероховатость поверхности (R_a), мкм. Изменение шероховатости поверхности осуществлялось на цифровом измерителе шероховатости поверхности TR-200, взвешивание образцов - на весах лабораторных ВЛТ-1, производительность процесса - по величине удельного массового съёма, мг/(см²·мин). Значения показателей для данных условий магнитно-абразивной обработки определялись как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах. Результаты испытаний образцов СОЖ приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Составы СОЖ	Обрабатываемый материал Сталь 45	
	ΔG , мг/(см ² ·мин).	R_a , мкм
Прототип	13,34	0,32
Состав I	11,45	0,29
Состав II	14,03	0,24
Состав III	12,75	0,30

В результате испытаний установлено, что оптимальным является состав II, который обладает наибольшей устойчивостью и хорошими технологическими свойствами, повышающими производительность магнитно-абразивной обработки и снижающими шероховатость обрабатываемых поверхностей. Анализ показал, что заявляемый состав II по сравнению с I, III и прототипом для стали 45 повышает производительность магнитно-абразивной обработки в 1,05-1,23 раза, а также снижает шероховатость обрабатываемой поверхности в 1,21-1,33 раза. К преимуществам предлагаемых составов СОЖ следует отнести использование основного вещества в виде отходов масложирового производства, что увеличивает моющую, смазывающую и эмульгирующую способность, а также простоту изготовления и недефицитность исходных компонентов.

Таким образом, ряд лабораторных испытаний показал, что заявляемый концентрат СОЖ предлагается к использованию при концентрации 3% в воде на предприятиях машиностроительного комплекса, что приводит к меньшим расходам природных ресурсов и образованию значительного количества нефтесодержащих отходов. Технология приготовления данного концентрата СОЖ безотходна и позволяет снизить экологические риски воздействия СОЖ как загрязнителей биосферы. Заявляемый концентрат СОЖ обладает улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками, что позволяет повысить производительность обработки материалов с уменьшением шероховатости поверхности и обеспечить защиту окружающей среды соответственно.

(57) Формула изобретения

Концентрат смазочно-охлаждающей жидкости, содержащий отходы масложирового производства и воду, отличающийся тем, что концентрат содержит триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты, гидроокись калия и полиметилсилоксановую жидкость, а в качестве отходов масложирового производства используют смесь жировых гудронов и соапстоки растительных масел и жиров, мас. %:

отходы масложирового производства	30,0-40,0
триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты	5,0-7,0

RU 2769 313 C1

Гидроксид калия	2,0-3,0
Полиметилсилоксановая жидкость	0,1-0,2
Вода	49,8-62,9

5

10

15

20

25

30

35

40

45