

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Автоматика и управление»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

_____ / Л.С. Казаринов

« ____ » _____ 2020 г.

Автоматизация алгоритма расчета механических характеристик стали
и термообработки

Пояснительная записка
к выпускной квалификационной работе
ЮУрГУ – 270304.2020.062 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

к.т.н., доцент каф.АиУ

_____ / Колесникова О.В.

« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы

Студент гр. КЭ-417

_____ / Бобрик А.В.

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер

к.т.н., доцент каф.АиУ

_____ / Барбасова Т.А.

« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск

2020

АННОТАЦИЯ

Бобрик А.В. Автоматизация алгоритма расчета механических характеристик стали и термообработки. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШ ЭКН; 2020, 91 с., 48 ил., 1 табл., библиогр. список – 73 наим., 2 прил., 4 листа чертежей.

В работе рассматривается автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки.

Проведен обзор существующих методов расчета, основанных на проведении опытов, и способов автоматизации расчета. Приведено методическое обеспечение расчета механических характеристик стали и термообработки. Приведено описание разработанного программного обеспечения. Приведены результаты тестирования программного обеспечения.

					27.03.04.2020.366 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Автоматизация алгоритма расчета механических характеристик стали и термообработки	Лит	Лист	Листов
Разраб.	Бобрик						4	91
Провер.	Колесникова					ФГАОУ ВО ЮУрГУ «НИУ»		
Н. Контр.	Бардасова							
Утверд.	Казаринов							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	8
1.1 Общие сведения о группе «ЧТПЗ»	8
1.2 Классификация стали	10
1.3 Механические характеристики стали	12
1.4 Обзор литературы	14
1.5 Постановка цели и задачи работы	29
2 МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	30
2.1 Сбор и подготовка данных	30
2.2 Метод определения механических свойств стали и термообработки	35
2.3 Регрессионный анализ	41
3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	47
3.1 Среда разработки	47
3.2 Автоматизация расчета твердости стали после отпуска	57
3.3 Автоматизация расчета предела прочности стали после отпуска	65
3.4 Автоматизация расчета предела текучести стали после отпуска	68
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	75
ПРИЛОЖЕНИЯ	82
ПРИЛОЖЕНИЕ А	82
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	91

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире стальные трубы востребованы в большом количестве областей экономики. Они используются в строительстве жилых зданий, теплотрасс, обработке и добыче полезных ископаемых, химической промышленности, авиа- и автомобилестроении, в газо- и нефтепроводах.

Для каждого направления производства необходимы определенные параметры трубной продукции, которые необходимо достичь производителю. С каждым годом развитие отраслей, в которых используется трубная продукция, развивается и становится более уникальной, этим самым усложняя процесс изготовления изделий.

Все чаще заказчику необходима продукция с его собственными техническими условиями, которые зачастую являются уникальными. Предприятие, производящее трубную продукцию не в состоянии за короткое время поменять параметры производства и перестроить его так, как необходимо заказчику.

Производство труб трудоемкий и длительный процесс, который начинается со сталелитейного производства. После чего проходит несколько этапов подготовки перед непосредственным изготовлением трубы.

Каждый тип стальных труб регламентируется специальным ГОСТ. В нем приведены характеристики готовой продукции в зависимости от марки стали. Но если заказчику необходима продукция, параметры которой не являются стандартом, возникает ряд проблем.

Производителю необходимо рассчитать и подобрать такие параметры производства, чтобы получить трубные изделия, обладающие механическими характеристиками, удовлетворяющими потребности заказчика. В большинстве случаев это делают путем проведения исследований, отбора проб, что является разрушающим видом контроля качества. Это приводит к дополнительным расходам, опытный образец приходится отправлять на переработку, либо выбрасывать.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		6

Из-за отсутствия конкретных прописанных параметров производства возрастает количество брака в опытно-промышленных партиях, которое существенно сказывается на прибыли предприятия.

Можно сделать вывод, что расчет механических характеристик стали и термообработки играет огромную роль в трубном производстве. Ведь именно эти характеристики особенно важны заказчикам из абсолютно разных областей экономики.

Настоящая работа направлена на автоматизацию расчета механических характеристик стали и термообработки с целью сокращения брака в опытно-промышленных партиях и количества лабораторных исследований.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время для каждого направления производства, в котором используются стальные трубы необходимы различные параметры изделия. Для их получения производителю требуется заранее рассчитать и подобрать параметры, с которыми будет возможно достичь заданных условий заказчика. Для этого необходимо провести обзор существующих методов, проводимых опытным путем, и алгоритмов. Также важно знать, как различные параметры стали влияют на ее механические характеристики.

1.1 Общие сведения о группе «ЧТПЗ»

Промышленная группа «ЧТПЗ» занимает ведущее место среди металлургических комплексов и производителей трубной продукции в России с общей долей рынка около 17 %. Выручка компании превышает \$ 2 млрд. в год, на предприятиях компании «ЧТПЗ» работает около 25 000 человек. Промышленная группа входит в десятку крупнейших трубных компаний мира и объединяет целый ряд компаний черной металлургии. В ее состав входят: Челябинский трубопрокатный завод, Первоуральский новотрубный завод, складской комплекс, осуществляющий реализацию трубной продукции Группы в регионах, компанию по заготовке и переработке металлолома «МЕТА»; предприятия по производству магистрального оборудования «СОТ», «ЭТЕРНО», «MSA» (Чехия); нефтесервисный бизнес представлен компанией «Римера».

Группа «ЧТПЗ» – вертикально интегрированная универсальная компания, действующая во всех сегментах рынка труб, осуществляющая экспорт продукции в 52 страны мира. Обладая достаточным количеством мощностей по производству сварных и бесшовных труб широкого сортамента, развитой системой складов, «ЧТПЗ» позиционирует себя как эффективного универсального игрока на трубном рынке России и стран СНГ. Заводы группы

										Лист
										8
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2020.366 ПЗ					

«ЧТПЗ» специализируются на изготовлении трубной продукции для всех основных секторов экономики, производят трубы от размера капиллярной трубки (0,6 мм в диаметре) до труб большого диаметра (1420 мм в диаметре) [1].

Челябинский трубопрокатный завод, основанный в 1942 году, один из крупнейших производителей стальных труб в России поставляет на рынок: трубы электросварные большого диаметра, с внутренним гладкостным и наружным антикоррозионным покрытием (508–1422 мм); бесшовные горячедеформированные большого диаметра (245–550 мм); бесшовные горячедеформированные малого диаметра (114–178 мм); бесшовные холоднодеформированные (89–426 мм).

Потребителями продукции Челябинского трубопрокатного завода являются компании нефтегазового и энергетического комплексов, машиностроения, строительной индустрии, сельского хозяйства и других отраслей промышленности. Из труб большого диаметра «ЧТПЗ» проложено свыше 70 % отечественных газопроводов. Всего за историю предприятия выпущено более 60 млн. тонн ТБД. Среди клиентов – крупнейшие российские нефтегазовые компании: «Газпром», «Транснефть», «Роснефть», «Лукойл», «Сургутнефтегаз» и другие [1].

Стальные трубы широко используются во многих отраслях экономики: строительстве жилых зданий, теплотрасс, обработке и добыче полезных ископаемых, химической промышленности, авиа- и автомобилестроении. Для достижения каждой цели используются различные виды профилей, которые различают по форме, типу производства, материалу и особенностям назначения. Каждый вид проката отличается размерами: длине, диаметру и толщине стенки.

Бесшовные трубы горячедеформированного проката используются в химической промышленности, при бурении скважин, для транспортировки жидкостей и газов в системах с высоким давлением. Пользуются спросом в нефте-газодобывающей промышленности, судостроении и машиностроении. Бесшовные холоднодеформированные трубы также востребованы в химической

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		9

промышленности, также в сферах, которые требуют минимального веса системы, в авиа- и автомобилестроении.

1.2 Классификация стали

Сталью называют сплав железа с содержанием углерода до 2,14 % и другими элементами. Стали классифицируют по следующим признакам:

- химическому составу,
- способу производства,
- содержанию вредных примесей,
- структуре,
- области применения.

Основным признаком, по которому классифицируют стали, является их химический состав. Он определяет марку и название стали. По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные. По способу производства стали бывают: конвертерные, мартеновские, электростали и стали особых методов выплавки. По степени раскисления стали производят кипящие, спокойные и полуспокойные. По качеству, которое формируется в основном на стадии выплавки и определяется содержанием таких вредных примесей, как сера и фосфор, стали бывают: обыкновенного качества, качественные, особовысококачественные [2–4].

В зависимости от химического состава сталь разделяют на две группы: углеродистую и легированную (см. рисунок. 1.1).

Углеродистая сталь не содержит легирующих добавок, ее делят на 3 вида:

- низкоуглеродистую (содержит до 0,25 % углерода);
- среднеуглеродистую (содержит от 0,25 % до 0,6 % углерода);
- высокоуглеродистую (содержит более 0,6 % углерода).

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		10



Рисунок 1.1 – Классификация стали по химическому составу

В легированной стали присутствуют примеси других металлов, которые улучшают ее механические характеристики. Данный вид стали делят на 3 вида, в зависимости от процентного содержания в ней добавок:

- высоколегированная (содержит от 10 % до 50 % добавок);
- среднелегированная (содержит от 2,5 % до 10 % добавок);
- низколегированная (легирующих элементов в составе менее 2,5 %).

Высоколегированную сталь в свою очередь подразделяют на 3 типа:

- коррозионностойкие (обладает стойкостью против химической и электрохимической коррозии, коррозии под напряжением, нержавеющей стали, в составе которых хрома более 12 %);
- жаростойкие (обладающие стойкостью против химического разрушения в газовых средах при температуре выше 500 С, работающие в ненагруженном и слабонагруженном состоянии);
- жаропрочные (работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью) [5–8].

1.3 Механические характеристики стали

В зависимости от области использования стальных труб требуется достижение определенных механических свойств стали при их производстве. Под механическими характеристиками понимают совокупность свойств, которые характеризуют сопротивление металла под действием приложенных к нему внешних механических сил, нагрузок. Силы могут быть приложены в виде:

- статической нагрузки (плавно возрастающей);
- динамической нагрузки (возрастающей резко, с большой скоростью);
- повторно переменной нагрузки (многократно прикладываемой, изменяющейся по амплитуде или направлению).

К таким характеристикам относятся: твердость, предел прочности и предел текучести.

Твердость стали – это способность материала сопротивляться вдавливанию в него другого, более твердого тела. Предел прочности – пороговая величина механического воздействия, выше которого наступает разрушение материала. Предел текучести показывает, при какой величине напряжения при которой начинает развиваться пластическая деформация.

Выходные механические характеристики стали достигаются путем подбора добавок. Добавка – химические элементы, входящие в состав стали для улучшения ее физических свойств. Каждая из них определенным образом влияет на конечный результат [9, с. 5].

Добавки, вводимые в основной состав стали, с целью получения определенных механических или физических характеристик, называются легирующими. В зависимости от их количества легированную сталь делят на 3 группы: высоколегированную, среднелегированную и низколегированную.

К добавкам, улучшающим механическим свойствам стали относятся следующие химические элементы (см. таблицу 1.1).

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		12

- метод Бринелля;
- метод Виккерса;
- метод Роквелла;
- метод Шора.

При определении твердости материалов в заводской и лабораторной практике пользуются двумя методами:

- методом Бринелля;
- методом Роквелла.

Метод Бринелля один из основных способов определения твердости, который относится к методам вдавливания [15–18].

Способ определения твердости по Бринеллю изложен в ГОСТ 9012–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю». Данный ГОСТ был разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР в 1959 году, является действующим по настоящее время.

При определении твердости этим методом стальной шарик определенного диаметра вдавливают в тестируемый образец под действием нагрузки, приложенной перпендикулярно к поверхности образца, в течение определенного времени [19]. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка. Число твердости по Бринеллю обозначается буквами НВ, и его определяют путем деления нагрузки на площадь поверхности сферического отпечатка (см. рисунок 1.2).

На рисунке 1.2 приняты обозначения: D – диаметр стального шарика, P – нагрузка, под действием которой вдавливают стальной шарик, d – диаметр отпечатка, h – глубина отпечатка.

Испытание проводится следующим образом: вначале дают небольшую предварительную нагрузку для установления начального положения индентора на образце, затем прилагается основная нагрузка, образец выдерживают под ее действием, измеряется глубина внедрения, после чего основная нагрузка

снимается. При определении твердости методом Бринелля, измерения производят до упругого восстановления материала.

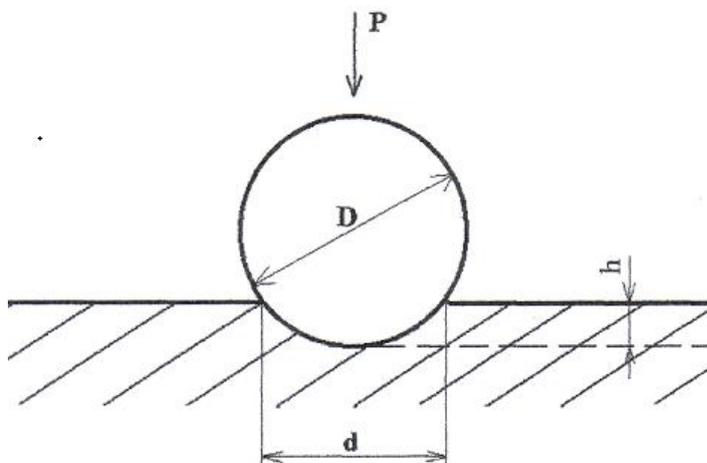


Рисунок 1.2 – Определение твердости по Бринеллю

Индентор (полированный закаленный стальной шарик) вдавливают в поверхность испытуемого образца (толщиной не менее 4 мм) с регламентированным усилием. Через 30 с после приложения нагрузки измеряют глубину отпечатка, оставшегося на поверхности образца, который тем меньше, чем тверже металл.

Твердость по Бринеллю $HВ$ рассчитывается как «приложенная нагрузка», деленная на «площадь поверхности отпечатка», с помощью формулы (1).

$$HВ = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

В формуле (1) приняты обозначения: P – нагрузка на стальной шарик, [Н]; D – диаметр стального шарика, [мм]; d – диаметр отпечатка, [мм].

Для удобства в ГОСТе приведены таблицы чисел твердости по Бринеллю и зависимости от диаметра шарика, диаметра отпечатка и нагрузки.

Фрагмент таблицы чисел твердости по Бринеллю при диаметре шарика $D=1$ [мм], испытательной нагрузке $P = 9,8$ [Н] приведен ниже (см. рисунок 1.3), где d [мм] – диаметр отпечатка стального шарика.

Для определения твердости стали опытным путем необходимы определенные условия состояния образца:

- толщина образца должна минимум в 8 раз превышать глубину отпечатка h ;
- поверхность образца должна быть гладкой и плоской, в соответствии с ГОСТ 2789 не более 2,5 мкм;
- образец должен быть подготовлен таким образом, чтобы не изменялись свойства металла в результате механической или другой обработки, например от нагрева или наклепа.

d , мм	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,250	20,0	19,9	19,7	19,6	19,4	19,3	19,1	19,0	18,8	18,7
0,260	18,5	18,4	18,2	18,1	17,9	17,8	17,7	17,5	17,4	17,3
0,270	17,1	17,0	16,9	16,8	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,0

Рисунок 1.3 – Фрагмент чисел твердости по Бринеллю

Важно отметить, что величины твердости по Бринеллю не имеют точного метода перевода их в другие величины твердости или прочности при растяжении.

Рассмотрим метод Роквелла.

Метод определения твердости металла по Роквеллу применяется в случае, когда нужно протестировать заготовку небольшой толщины. Кроме этого, подобным образом проверяется твердость поверхностного слоя изделия, к примеру, прошедшего закалку.

Способ нахождения твердости по Роквеллу изложен в ГОСТ 9013–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу». Данный ГОСТ был утвержден и введен в действие комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР в 1959 году, является действующим по настоящее время.

Определение твердости металлов методом Роквелла проводится следующим образом. Метод основан на вдавливании более твердого объекта в испытуемый. Для этого используется специальный алмазный наконечник, который имеет форму правильной пирамиды [20].

Нагрузка прикладывается к наконечнику на протяжении определенного времени. При этом время выдержки и величина нагрузки могут существенно различаться. Согласно установленным стандартам в ГОСТ 9013–59, нагрузка может быть от 1 до 100 [кгс]. При этом уточняются конкретные значения из этого промежутка.

Полученные отпечатки алмазного конуса измеряются. Наиболее важными показателями в этом случае можно назвать размер диагоналей оставшегося отпечатка.

Существует 11 шкал определения твердости по методу Роквелла (А; В; С; D; E; F; G; H; K; N; T), основанных на комбинации «индентор (наконечник) – нагрузка» [21–23]. Наиболее широко используются два типа инденторов: шарик из карбида вольфрама диаметром 1/16 дюйма или такой же шарик из закаленной стали, и конический алмазный наконечник с углом при вершине 120° . Далее приведена схема процесса измерения твердости с помощью наконечника из алмаза (см. рисунок 1.4).

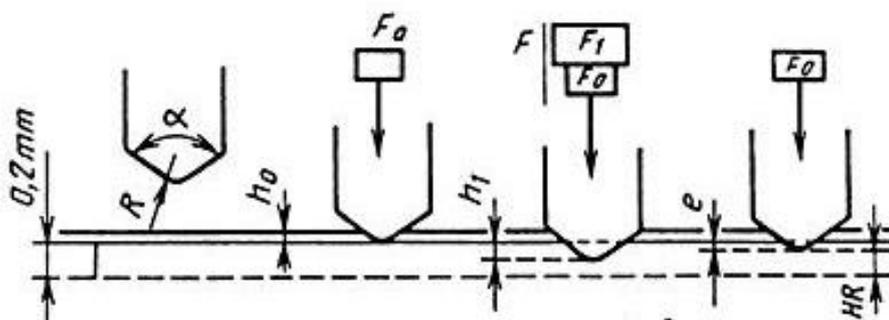


Рисунок 1.4 – Схема проведения измерения твердости при применении алмазного наконечника

На рисунке 1.4 приняты обозначения: R – радиус сферической части алмазного конусного наконечника, [мм]; α – угол при вершине алмазного конусного наконечника, [градус]; F_0 – предварительное усилие, [Н]; F_1 – основное усилие, [Н]; h_0 – глубина внедрения наконечника под действием предварительного усилия, [мм]; h_1 – глубина внедрения наконечника под действием основного усилия, [мм]; e – глубина внедрения наконечника после снятия основного усилия в единицах измерения 0,002 мм.

Полученные данные сверяются с табличными значениями, в которых учитывается величина приложенной силы и время выдержки. Рассматриваемая методика позволяет получить показатель твердости в своих условных единицах [24].

Процесс измерения можно разделить на несколько этапов:

- определяется типа шкалы;
- устанавливается подходящий индикатор (необходимо, чтобы он соответствовал типа установленной шкалы);
- проводится два пробных теста, которые необходимы для корректирования работы применяемого оборудования;
- затем прикладывается предварительная нагрузка, равная 10 кгс;
- после прикладывается основная нагрузка и выдерживается определенный период, который позволяет получить максимальное значение;
- убирается нагрузка и считывается полученный результат.

Чем тверже материал, тем меньше будет глубина проникновения наконечника в него. Чтобы при большей твердости материала не получалось большее число твердости по Роквеллу, вводят условную шкалу глубин, принимая за одно ее деление глубину, равную 0.002 мм. При испытании алмазным конусом предельная глубина внедрения составляет 0.2 мм или 100 делений, при испытании шариком – 0.26 мм или 130 делений.

При проведении опыта существует ряд факторов, влияющих на точность измерений:

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		19

преимущество. В результате исследований от прямых испытаний получают значения с минимальной ошибкой, наиболее близкие к истинным.

Но также данный способ имеет ряд недостатков.

Во-первых, метод определения механических характеристик стали опытным путем является разрушающим видом контроля качества. Это приводит к увеличению затрат при производстве, по причине неликвидности продукции после отбора пробы. Опытные образцы приходится выбрасывать либо перерабатывать, что влечет за собой дополнительные расходы. Также следует отметить, что для сверхпрочных материалов существенным ограничением выступает характеристики оборудования, на котором проводится испытание. В некоторых случаях максимальной предельной нагрузки разрывной машины оказывается недостаточно.

Определив твердость стальной заготовки, появляется возможность рассчитать такую механическую характеристику как предел прочности. Это можно сделать с помощью стандартного метода испытаний и определения механических характеристик стальных изделий «А370–17» [25]. В данном стандарте приведены таблицы, в которых отображены примерные взаимосвязи значений твердости и примерной прочности на растяжение сталей. Возможно, что стали с различным составом и параметрами обработки будут иметь другую зависимость предела прочности от твердости, и отличаться от данных, представленных в этой таблице. Также данный метод использовать для аустенитных нержавеющей сталей. Если требуются более точные преобразования, они должны быть разработаны специально для каждого типа стали, в зависимости от его химического состава и параметров термообработки. Далее приведен фрагмент таблицы, в которой отображена зависимость предела текучести от твердости стали, найденной различными способами (см. рисунок 1.6).

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		21

дорогостоящего лабораторного оборудования, разрывных машин большой мощности.

Развитие современной техники требует создание новых технологий и стремительную оптимизацию существующих [27–33]. В основе их совершенствования и разработки лежит проведение эксперимента. Один из самых эффективных способов проведения исследований является метод на основе использования математической модели планирования эксперимента. В книге Новик Ф.С. «Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов» изложено несколько методов планирования для решения некоторых задач металлостроения, термической обработки и других областей технологии металлов [34]. Выбор химического состава, параметры термической обработки и ее режимы устанавливаются на основе проведения опыта. Строгих теорий для сложных процессов, протекающих в металлах и сплавах, которые позволяют подбирать или разрабатывать оптимальные режимы не существует. Авторы предлагают решение данной проблемы путем использования математико-статистических методов. Этот способ существенно сокращает время проведения эксперимента, повышает качество результатов и при этом снижает затраты на исследование [34, с. 6]. В книге приведены несколько методов планирования эксперимента, которые, по мнению авторов, представляют наибольший интерес для задач, связанных с технологией металлов.

Первым примером в книге является корреляционный анализ. Корреляционный анализ – это способ обработки статистических данных, который заключается в нахождении зависимостей между ними, определении коэффициентов корреляции между переменными. Во многих ситуациях с помощью него можно установить статистические связи параметров оптимизации. При высокой корреляции между какими-то параметрами, любой из них можно исключить. Это говорит о том, что информацию, которую он несет об объекте исследования можно получить с помощью другого параметра.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		24

Для нахождения коэффициента парной корреляции, то есть между двумя параметрами автоматизации, автор приводит следующую формулу (3).

$$r_{y_1}, r_{y_2} = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - y_1) \cdot (y_{2u} - y_2)}{\sqrt{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - y_1)^2 \cdot (y_{2u} - y_2)^2}} \quad (3)$$

В формуле (3) приняты обозначения: r – коэффициент корреляции, y_1 – первый параметр, y_2 – второй параметр, N – число опытов, u – номер опыта.

Корреляционный анализ помогает выявить взаимосвязь между параметрами, которые несут об объекте исследования одинаковую информацию. Это позволяет упростить задачу оптимизации, исключив один из таких параметров [34, с. 16].

Авторы предлагают изучить данные, полученные опытным путем, установить взаимосвязи между имеющимися параметрами для того, чтобы в дальнейшем использовать и иметь возможность предсказания результатов экспериментов.

В статье «Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости», авторами которой являются П.И. Стоев и В.И. Мощенюк, проанализированы методы определения механических характеристик с помощью измерения твердости методом шариковой пробы [35]. Для анализа были выбраны наиболее распространенные на практике методы шариковой пробы, основанные на вдавливании сферического индентора (шара) в исследуемый материал. Особое внимание при проведении анализа обращали на точность, которая обеспечивается с помощью метода определения механических свойств по значениям твердости.

Авторы статьи все существующие методы определения предела текучести по твердости предлагают разделить на два класса:

– методы, основанные на определении твердости, которая характеризует упрочняемость материала и оценивается равномерной деформацией при растяжении;

										Лист
										25
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2020.366 ПЗ					

– методы, основанные на определении числа твердости при деформации в лунке, близкой к 0,2 %.

В статье подробно рассматривается метод М.С. Дрозда, который относится к первому классу методов определения предела текучести по значению твердости, в котором особое внимание акцентируется на главном недостатке методов определения твердости по Бринеллю. Он заключается в росте твердости с увеличением степени нагружения. М.С. Дрозд предлагает свой собственный метод с использованием нового числа твердости. В его способе предел текучести определяется по формуле (4):

$$\delta = 0,185 \cdot H. \quad (4)$$

В формуле (4) приняты обозначения: δ – величина предела текучести, H – новое число твердости.

Новое число твердости М.С. Дрозд предлагает найти по формуле (5):

$$H = \frac{9000}{130 - H_{RB}}. \quad (5)$$

В формуле (5) принято обозначение: H_{RB} – твердость по Роквеллу.

Также в статье приведена формула для нахождения предела прочности по формуле (6).

$$\delta_B = 9,55 - (\sqrt{149 + H} - 12,2). \quad (6)$$

В формуле (6) приняты обозначения: δ_B – величина предела прочности, H – новое число твердости.

Авторы также рассматривают методы расчета М.П. Марковца. Им впервые был предложен способ определения предела текучести путем вдавливания

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		26

сферического индентора до получения в лунке деформации 0,2 %. М.П. Марковец установил зависимость между пределом текучести и твердостью. Но при этом коэффициент пропорциональности будет постоянно меняться, в связи с тем, что соотношение между упругой и остаточной деформацией в лунке с повышением прочности возрастает. Исходя из этого, значение коэффициента пропорциональности будет изменяться в зависимости от прочности материала.

После проведенного в работе анализа, авторы статьи сделали вывод, что наиболее физически обоснованные методы определения прочности принадлежат М.П. Марковцу. Также анализ показал возможность применения методов твердости для приближенного определения пределов прочности и текучести металлов. Наиболее точными оказались методы Дрозда.

В статье хорватского профессора и доктора наук В. Smoljan [36] представлен метод расчета твердости стали после закалки и отпуска. На основании проведенных исследований, автор делает заключение о наилучшей зависимости параметров и предлагает качественный способ расчета механических характеристик.

Интенсивный рост промышленности и строительства в России предъявляет все более высокие требования к качеству и прочностным характеристикам материалов, используемых для изготовления деталей конструкций, работающих в напряженных состояниях. Один из способов улучшения их механических свойств – создание сложных высоколегированных специальных систем, которые, в конечном итоге, приводят к существенному удорожанию конструкций. Поэтому в последнее время внимание исследователей направлено на развитие и исследование наноструктурных состояний, полученных в недорогих сплавах, которые позволяют значительно расширить класс конструкционных материалов, благодаря созданию повышенных прочностных свойств в них [37, 38].

В статье А.Г. Корчунова «Целевые функции взаимосвязи механических свойств и структурных параметров конструкционных наноструктурированных сталей» описано создание программы, позволяющей прогнозировать показатели

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		27

механических свойств стали марок 20 и 45. Это открывает возможность сократить продолжительность научного исследования, а также затраты, связанные с проведением опытов.

Учитывая новизну проводимых исследований по изучению взаимосвязей между множествами механических свойств материала, параметрами микроструктуры и параметрами управления на первом этапе при обработке экспериментальных данных использовалось статистическое описание. Анализ экспериментальных данных производился в программе STATISTICA. Методом для статистической обработки результатов экспериментальных наблюдений использовали построение уравнений множественной регрессии. Это позволило свести частные, разрозненные данные к некоторому линейному графику, приблизительно отражающему их внутреннюю взаимосвязь, и получить возможность по значению одной из переменных приблизительно оценивать вероятное значение другой переменной. В результате регрессионного анализа получены уравнения взаимосвязи механических свойств и структурных параметров наноструктурированных сталей марок 20 и 45.

Анализ научно-технических источников показал, что в настоящее время осуществляется уточнение существующих методов контроля механических свойств стали [39–43]. Разрабатываются современные автоматизированные комплексы, использующие методы шариковой пробы, для определения прочностных свойств материала корпуса реакторов и других элементов конструкций [44, 45]. Постоянно совершенствуются методы контроля твердости [46].

В ходе обзора литературы по теме исследования, рассмотрены методы расчета механических характеристик стали. Данные способы объединяет их реализация, которую возможно осуществить лишь опытным путем. Данная процедура требует от предприятия особых условий проведения исследования, подготовленный персонал и специальное техническое обеспечение, что влечет за собой большие расходы. После отбора пробы продукция отправляется на

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		28

переработку, либо на выброс, т.к. данный способ определения механических характеристик стали относится к числу разрушающих. Стальная деталь теряет свои физические свойства и становится непригодной для использования.

Одно из решений данной проблемы – автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки. Автоматизированный расчет позволит ускорить и упростить производство опытно-промышленных партий, соответствующих техническим условиям заказчика.

1.5 Постановка цели и задачи работы

Целью выпускной квалификационной работы является сокращение количества брака в опытно-промышленных партиях и лабораторных исследований на основе автоматизации расчета механических характеристик стали и термообработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проведение обзора методов расчета механических характеристик стали;
- сбор и подготовка необходимых данных для автоматизации метода расчета;
- разработка программного обеспечения расчета механических характеристик стали: твердости, предела прочности и текучести после отпуска;
- отработка программного обеспечения на тестовых данных.

2 МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В первой части работы был проведен обзор методов расчета механических характеристик стали, большую часть из которых возможно реализовать лишь опытным путем. Этот процесс является достаточно затратным и трудоемким для предприятия, в связи с привлечением дополнительных ресурсов для его реализации.

Технологии производства не могут стоять на месте, для жизнедеятельности им необходимо постоянное развитие, оптимизирование существующих решений и внедрение новых. Существуют расчетные методики, позволяющие задействовать меньшее количество ресурсов для их реализации, обладающие высокой точностью результата. Для их применения необходимы статистические данные производственного процесса или профессиональных справочников исследуемой области. В настоящее время для сбора и хранения данных применяются автоматизированные информационно-управляющие системы, на основе которых также осуществляется управление технологическим процессом.

2.1 Сбор и подготовка данных

Автоматизированная система управления (АСУ) – комплекс аппаратных и программных средств и персонала, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия. АСУ являются одним из основных инструментов повышения обоснованности управленческих решений. В состав АСУ входят две системы управления объектами (см. рисунок 2.1):

- автоматизированная система управления предприятием (АСУП);
- автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУТП).

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		30

С помощью АСУП достигаются следующие цели:

- рациональное использование производственных мощностей, трудовых, материальных и денежных ресурсов;
- сокращение сроков подготовки производства к выпуску новых изделий;
- сокращение запасов незавершенного производства;
- освобождение управленческого персонала от трудоемких расчетных работ;
- улучшение качества принимаемых решений и обеспечение оперативности руководства предприятием.

Со стороны технологии функционирования АСУП решает следующие вопросы:

- получение и передача информации об управляемом объекте;
- переработка этой информации в соответствии с заданной целью;
- выдача управляющих воздействий на данный объект управления.

АСУ ТП предназначена для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления.

АСУ ТП – группа решений технических и программных средств, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием [49].

Информационная функция АСУ ТП позволяет осуществлять сбор, обработку и представление информации о состоянии автоматизированного технологического комплекса оперативному персоналу или для дальнейшей обработки.

К информационным функциям АСУ ТП относятся:

- централизованный контроль и измерение технологических параметров;
- косвенное измерение параметров;
- формирование и выдача данных оперативному персоналу АСУ ТП;
- подготовка и передача информации в смежные системы управления;

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		32

– обобщенная оценка и прогноз состояния автоматизированного технологического комплекса и его оборудования [49, с. 9].

Для передачи данных между контроллерами, серверами и операторскими рабочими станциями служат сети верхнего уровня АСУ ТП. Зачастую в состав сетей включают дополнительные узлы, такие как центральный сервер архива, инженерная станция или сервер промышленных приложений.

Большинство сетей верхнего уровня, которые применяются в современных АСУ ТП основывается на стандарте Ethernet (IEEE 802.3) или на его более быстрых вариантах Fast Ethernet и Gigabit Ethernet вместе с коммуникационным протоколом TCP/IP [50–58].

Ethernet – технология, позволяющая соединять проводные локальные сети (LAN) и взаимодействовать устройствам друг с другом, с помощью протокола, который является общим сетевым языком. Эта локальная сеть представляет собой сеть компьютеров и других электронных устройств, которая охватывает небольшую площадь (предприятие).

Автоматизированная система управления технологическими процессами позволяет осуществлять сбор информации, которая в дальнейшем используется для контроля технологических параметров и дальнейшего анализа данных.

В ПАО «ЧТПЗ» для передачи данных между контроллерами, серверами и операторскими рабочими станциями используется технология Ethernet. Информация с датчиков, установленных на объекте управления, передается на сервер, в общую базу данных. Затем передаются в корпоративную информационную систему (КИС).

КИС – это масштабируемая система, которая предназначена для комплексной автоматизации всех видов хозяйственной деятельности компаний, а также корпораций, требующих единого управления. Пользователь может запросить необходимую ему информацию и получить данные из КИС в виде таблиц Excel. Структурная схема АСУ ТП «ЧТПЗ» представлена на рисунке 2.2.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		33

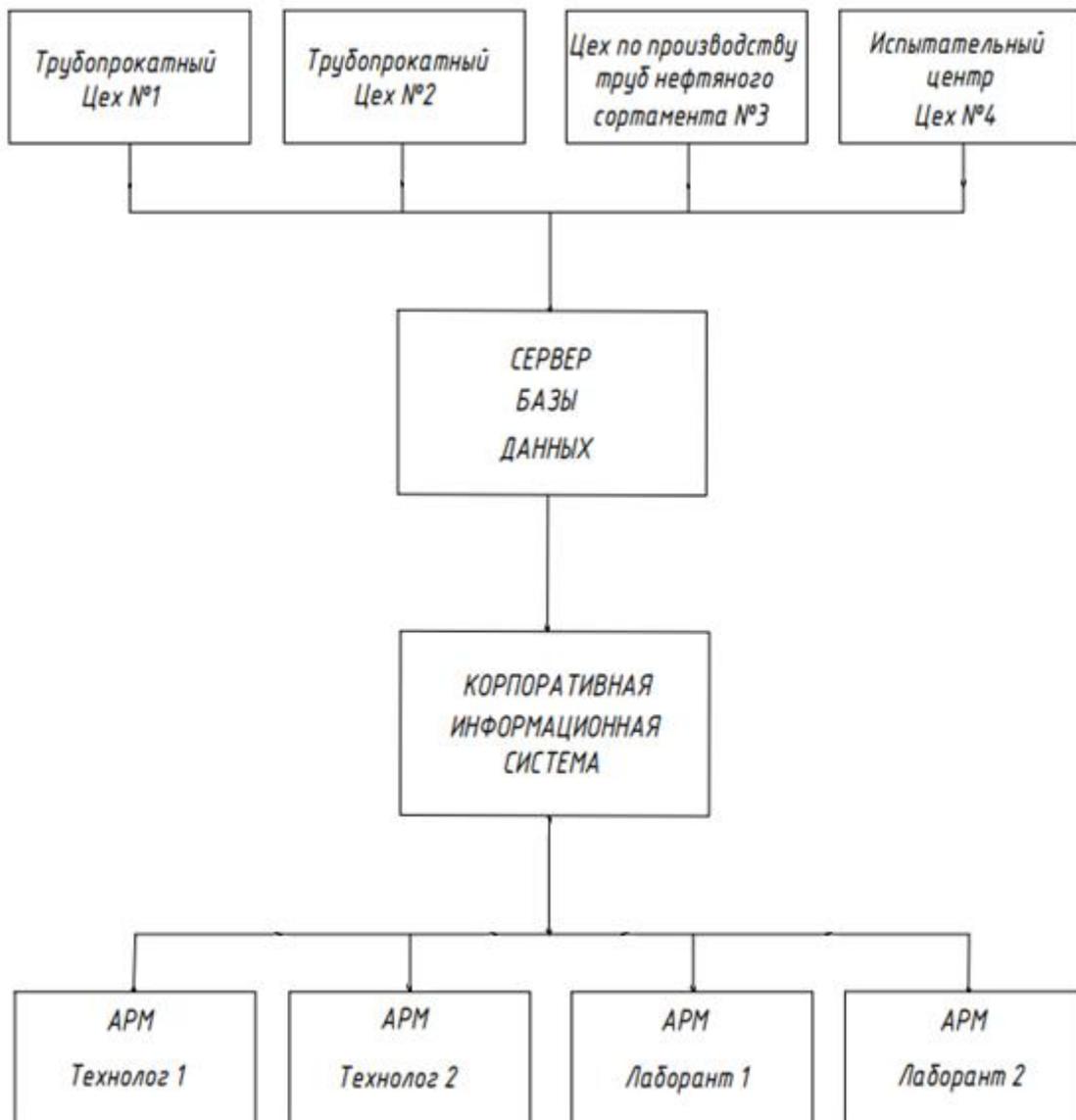


Рисунок 2.2 – Структурная схема АСУ ТП «ЧТПЗ»

Структурная схема АСУ ТП «ЧТПЗ» приведена в приложении Б.

Из цехов №1,2,3,4 данные с использованием технологии Ethernet поступают на сервер базы данных, а затем в КИС. Из КИС данные поступают на автоматизированные рабочие места (АРМ) технологов и лаборантов.

АРМ – комплекс средств вычислительной техники и программного обеспечения, располагающийся непосредственно на рабочем месте сотрудника и предназначенный для автоматизации его работы в рамках специальности [60].

Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2020.366 ПЗ

Лист

34

2.2 Метод определения механических свойств стали и термообработки

В первой части работы проведен обзор методов расчета механических характеристик стали, которые возможно реализовать, не прибегая к проведению опытов.

В статье хорватского профессора и доктора наук В. Smoljan [36] представлен метод расчета твердости стали после закалки и отпуска. На основании проведенных исследований, автор делает заключение о наилучшей зависимости параметров и предлагает качественный способ расчета механических характеристик.

Данный способ основан на нахождении твердости стали после отпуска с помощью уже известной твердости после закалки.

Для его реализации необходима кривая закаливания, которая показывает степень прокалики стали. Под прокаливаемостью понимают глубину проникновения закаленной зоны. При определении прокаливаемости методом торцевой закалки прокаливаемость стали одной плавки характеризуется кривой, построенной в координатах: твердость (по оси ординат) – расстояние от охлаждаемого торца (по оси абсцисс).

Для ее построения обратимся к ASTM A 255–02 [69]. ASTM – стандарты американского общества специалистов по испытаниям и материалам. Эти методы испытаний охватывают определение и описание методов испытаний для определения прокаливаемости сталей.

Блок-схема алгоритма расчета твердости приведена в приложении Б.

Первым шагом необходимо рассчитать идеальный критический диаметр. Идеальный критический диаметр (DI) – диаметр максимального сечения, прокаливающегося насквозь в «идеальной» жидкости, отнимающей тепло с бесконечно большой скоростью.

Идеальный критический диаметр находится по формуле (7):

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		35

$$DI = MF_C \cdot C \cdot MF_{Mn} \cdot Mn \cdot MF_{Si} \cdot Si \cdot MF_{Ni} \cdot Ni \cdot MF_{Cr} \cdot Cr \cdot MF_{Cu} \cdot Cu \cdot MF_V \cdot V, \quad (7)$$

где C – углерод, Mn – марганец, Si – кремний, Ni – никель, Cr – хром, Cu – медь, V – ванадий, MF_x – коэффициент для соответствующего химического элемента, обозначенного x .

Способ нахождения коэффициента MF_x приведен в виде формул, зависящих от количества химического элемента в составе стали (см. рисунок 2.3).

Up to 0.39 %, incl	$MF = 0.54 (\%C)$
Over 0.39 to 0.55 %, incl	$= 0.171 + 0.001 (\%C) + 0.265 (\%C)^2$
Over 0.55 to 0.65 %, incl	$= 0.115 + 0.268 (\%C) - 0.038 (\%C)^2$
Over 0.65 to 0.75 %, incl	$= 0.143 + 0.2 (\%C)$
Over 0.75 to 0.90 %, incl	$= 0.062 + 0.409 (\%C) - 0.135 (\%C)^2$
Up to 1.20 %, incl	$= 3.3333 (\%Mn) + 1.00$
Over 1.20 to 1.95 %, incl	$= 5.10 (\%Mn) - 1.12$
Silicon to 2.00 %, incl	$= 1.00 + 0.7 (\%Si)$
Nickel to 2.00 %, incl	$= 1.00 + 0.363 (\%Ni)$
Chromium to 1.75 %, incl	$= 1.00 + 2.16 (\%Cr)$
Molybdenum to 0.55 %, incl	$= 1.00 + 3.00 (\%Mo)$
Copper to 0.55 %, incl	$= 1.00 + 0.365 (\%Cu)$
Vanadium to 0.20 %, incl	$= 1.00 + 1.73 (\%V)$

Рисунок 2.3 – Формулы для нахождения коэффициента умножения

Затем необходимо найти значение начальной твердости стали и твердость при 50 % распаде мартенсита.

Начальная твердость стали находится по формуле (8).

$$IH = 35,395 + 6,990 \cdot x + 312,330 \cdot x^2 - 821,744 \cdot x^3 + 1015,479 \cdot x^4 - 538,346 \cdot x^5, \quad (8)$$

где IH – начальная твердость по шкале Роквелла, x – процентное содержание углерода в составе стали.

Твердость при 50 % распаде мартенсита находится по формуле (9).

DI ⁴	Dividing Factor
To 2.1, incl Over 2.1	DF = 4.68961 - 11.00832 X + 13.83314 X ² - 8.80283 X ³ + 2.78698 X ⁴ - 0.34880 X ⁵ DF = 1.00
To 3.1, incl Over 3.1	DF = 2.34904 - 0.28254 X - 1.42995 X ² + 1.16697 X ³ - 0.33813 X ⁴ + 0.03403 X ⁵ DF = 1.00
To 4.1, incl Over 4.1	DF = 5.66795 - 6.14648 X + 3.52874 X ² - 1.06026 X ³ + 0.16301 X ⁴ - 0.01015 X ⁵ DF = 1.00
To 4.4, incl Over 4.4	DF = 4.53651 - 2.92609 X + 1.00411 X ² - 0.17129 X ³ + 0.01369 X ⁴ - 0.00038 X ⁵ DF = 1.00
To 5.0, incl Over 5.0	DF = 4.39436 - 2.16072 X + 0.56027 X ² - 0.08145 X ³ + 0.00840 X ⁴ - 0.00053 X ⁵ DF = 1.00
To 5.3, incl Over 5.3	DF = 4.20866 - 1.54405 X + 0.08294 X ² + 0.08613 X ³ - 0.01963 X ⁴ + 0.00127 X ⁵ DF = 1.00
To 5.6, incl Over 5.6	DF = 4.44473 - 1.79085 X + 0.24617 X ² + 0.03378 X ³ - 0.01189 X ⁴ + 0.00084 X ⁵ DF = 1.00

Рисунок 2.4 – Фрагмент таблицы формул для нахождения коэффициента деления

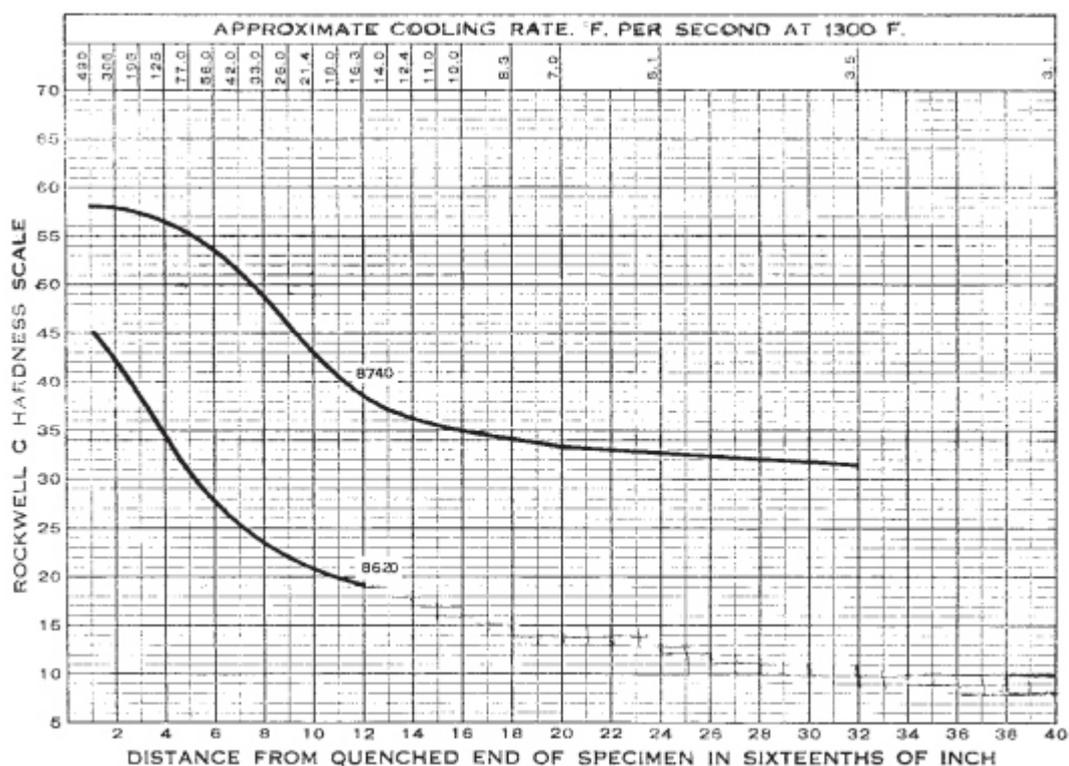


Рисунок 2.5 – Факсимильное изображение стандартной таблицы прокаливаемости с типичными кривыми прокаливаемости

где T – температура отпуска (с учетом интегрирования времени), T_1 – исходная температура отпуска (без учета интегрирования времени), t – время отпуска.

После приведения длительности отпуска к 1 часу, можно приступить к нахождению твердости стали после отпуска. Для этого необходимо найти степень закалки (S) и фактор (K).

Степень закалки автор предлагает найти по формуле (12).

$$S = \frac{HRC_q}{HRC_{max}}, \quad (12)$$

где S – степень закалки, HRC_q – номинальная твердость после закалки, HRC_{max} – максимальное значение твердости после закалки.

Фактор найдем по формуле (13).

$$K = \exp \left[\left(\frac{T+273}{808,69} \right)^{6,7484} \cdot S^{1,1821} \cdot E_d^{-0,3232} \right], \quad (13)$$

где K – фактор, T – температура отпуска (с учетом интегрирования времени), S – степень закалки, E_d – расстояние Джомини.

Затем по формуле (14) найдем твердость после отпуска.

$$HRC = \left(\frac{HRC_q - HRC_{min}}{K} \right) + HRC_{min}, \quad (14)$$

где HRC – твердость стали после отпуска, HRC_{min} – минимальное значение твердости после закалки, HRC_q – номинальная твердость после закалки.

К важным механическим характеристикам отпущенной стали относится предел текучести и прочности. Существуют стандартные таблицы перевода твердости стали к данным параметрам. Для их нахождения обратимся к

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		40

ASTM A370–17 [25]. В данном стандарте приведены таблицы перевода параметров стали. Фрагмент таблицы представлен на рисунке 2.7.

Rockwell C Scale, 150-kgf Load, Diamond Penetrator	Vickers Hardness Number	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
					15N Scale, 15-kgf Load, Diamond Penetrator	30N Scale, 30-kgf Load, Diamond Penetrator	45N Scale, 45-kgf Load, Diamond Penetrator	
68	940	...	920	85.6	93.2	84.4	75.4	...
67	900	...	895	85.0	92.9	83.6	74.2	...
66	865	...	870	84.5	92.5	82.8	73.3	...
65	832	739	846	83.9	92.2	81.9	72.0	...
64	800	722	822	83.4	91.8	81.1	71.0	...
63	772	706	799	82.8	91.4	80.1	69.9	...
62	746	688	776	82.3	91.1	79.3	68.8	...
61	720	670	754	81.8	90.7	78.4	67.7	...
60	697	654	732	81.2	90.2	77.5	66.6	...
59	674	634	710	80.7	89.8	76.6	65.5	351 (2420)
58	653	615	690	80.1	89.3	75.7	64.3	338 (2330)
57	633	595	670	79.6	88.9	74.8	63.2	325 (2240)
56	613	577	650	79.0	88.3	73.9	62.0	313 (2160)
55	595	560	630	78.5	87.9	73.0	60.9	301 (2070)
54	577	543	612	78.0	87.4	72.0	59.8	292 (2010)
53	560	525	594	77.4	86.9	71.2	58.6	283 (1950)

Рисунок 2.7 – Фрагмент таблицы перевода механических характеристик стали

В данной таблице приведены стандартные значения механических характеристик. В реальном производстве точное совпадение не может быть достигнуто. В этой связи, на основе табличных представленных значений определим аналитический вид зависимости с использованием линейной регрессии. Это позволит определить предел текучести и предел прочности стали, зная величину твердости стали после отпуска.

Блок-схемы алгоритмов нахождения предела прочности и текучести стали приведены в приложении Б.

2.3 Регрессионный анализ

При изучении стохастических зависимостей в технических задачах одним из главных моментов является установление вида зависимости Y от X_1, X_2, \dots, X_n , то есть вида уравнения регрессии.

$$\delta_y = \max |y_{pj} - y_{эj}|, \quad (19)$$

$$m_y = 1/N \sum_{j=1}^N (y_{pj} - y_{эj}), \quad (20)$$

$$\sigma_y = \sqrt{1/N \sum_{j=1}^N (y_{pj} - y_{эj})^2}, \quad (21)$$

где δ_y , m_y , σ_y – максимальные, средние и среднеквадратичные отклонения расчетных и фактических значений y_{pj} и $y_{эj}$; $j = 1, 2, \dots, N = m + l + k$ – номер опыта.

Формула, связывающая выходной эффект с действующими факторами, является линейной (22).

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + e_i, i = 1, \dots, n, \quad (22)$$

где y_i – зависимая переменная (переменная отклика); x_i – известная константа; a_0 , a_1 – параметры модели (свободный член и угловой коэффициент); $e_i = y_i - \hat{y}_i$ – регрессионный остаток или ошибка прогноза.

Теперь представим формулу, связывающая выходной эффект с действующими факторами в эмпирическом виде (23).

$$y = \sum_{i=0}^n a_i f_i(\bar{x}). \quad (23)$$

где a_i – i -тый оцениваемый параметр; $f_i(x)$ – i -ая известная функция; y – выходная переменная.

Критерий соответствия регрессии опытными данным заложен в требовании метода наименьших квадратов. Согласно этому методу, оцениваемые параметры (a_i) из формулы (23), находятся из условия минимума ошибки наблюдений (24).

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \min. \quad (24)$$

Коэффициент детерминации показывает, насколько хорошо уравнение, полученное с помощью регрессионного анализа, объясняет взаимосвязи между переменными (27).

$$R^2 = 1 - \frac{S_{ост}}{S_{общ}}. \quad (27)$$

где R^2 – коэффициент детерминации, $S_{ост}$ – факторная сумма квадратов отклонений, $S_{общ}$ – сумма остаточной и факторной суммы квадратов отклонений.

Коэффициент детерминации может изменяться в пределах от 0 до 1. Чем он выше, тем больше процентов дисперсии зависимой переменной объясняет данная модель.

Таким образом, в данном разделе рассмотрен метод, предложенный хорватским профессором и доктором наук В. Smoljan, определения механических характеристик стали и термообработки.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		46

3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

3.1 Среда разработки

Для автоматизации данного расчета механических характеристик стали и термообработки необходимо воспользоваться специальным программным обеспечением (ПО).

Существует множество прикладных пакетов и сред разработки для решения подобных задач, такие как MS Excel, R-Studio, Python и др.

MS Excel – это программа, предназначенная для работы с электронными таблицами, которая позволяет хранить, организовывать и анализировать информацию.

В данной программе существуют встроенные функции, с помощью которых можно рассчитать параметры модели линейной регрессии. Также можно воспользоваться специальным инструментом регрессионного анализа. Для того, чтобы воспользоваться им, необходимо активировать надстройку «Пакет анализа». С помощью него мы можем получить рассчитанные параметры линейной регрессии в одной таблице (см. рисунок 3.1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ВЫВОД ИТОГОВ								
3	<i>Регрессионная статистика</i>								
4	Множественный R	0,868736918							
5	R-квадрат	0,754703833							
6	Нормированный R-квадрат	0,693379791							
7	Стандартная ошибка	9,710083125							
8	Наблюдения	6							
10	<i>Дисперсионный анализ</i>								
11		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>ачимость F</i>			
12	Регрессия	1	1160,357143	1160,357143	12,30681818	0,024714			
13	Остаток	4	377,1428571	94,28571429					
14	Итого	5	1537,5						
16			<i>Стандарт</i>			<i>Нижние</i>	<i>Верхние</i>	<i>Нижние</i>	<i>Верхние</i>
		<i>Кэффициент</i>	<i>ная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>95%</i>	<i>95%</i>	<i>95,0%</i>	<i>95,0%</i>
17	Y-пересечение	64,14285714	11,17212274	5,741331225	0,004560379	33,12407	95,16164	33,12407	95,16164
18	Переменная X 1	-0,162857143	0,046423077	-3,508107493	0,024714164	-0,29175	-0,03397	-0,29175	-0,03397

Рисунок 3.1 – Вывод результатов регрессионного анализа в MS Excel

Наиболее важным показателем является «R-квадрат» (коэффициент детерминации) и коэффициенты. Коэффициент детерминации объясняет зависимость между изучаемыми параметрами. На рисунке 3.1 он равен 0,755, это означает, что расчетные параметры объясняют зависимость между изучаемыми на 75,5 %. Чем больше величина R-квадрата, тем более качественной считается модель.

Коэффициент «Y-пересечение» показывает каким будет описываемый параметр Y, при условии того, что все параметры в рассматриваемой модели равны 0. Коэффициент «Переменная x1» показывает влияние влияющего фактора X на описываемый параметр Y. Знак «-» указывает на отрицательное влияние, чем больше величина влияющего фактора, тем меньше величина описываемого фактора.

Существует множество распространенных программ для статистической и графической обработки данных. Одной из которых является R-Studio.

R – язык программирования и среда для статических вычислений и графического анализа. Это программа для анализа с открытым кодом, в которой реализованы все способы анализа данных [73]. Рассмотрим некоторые особенности R:

- данный язык программирования является интерпретируемым, командный интерпретатор – основной способ работы с ним;
- R имеет множество графических возможностей, которые помогут визуализировать сложные данные;
- обладает простыми средствами для сохранения результатов и обработки данных;
- способен импортировать данные из различных источников, включая базы данных и текстовые файлы, также записывать информацию в форматах всех этих систем.

Одной из главных особенностей языка R является возможность расширения с помощью специальных пакетов. Это позволяет пользователю

решать задачи любой сложности. В R реализовано большинство средств универсальных статистических вычислений, а также специфических алгоритмов для исследований в отдельных областях и решения специализированных задач.

Автоматизация алгоритма расчета механических характеристик стали и термообработки в выпускной работе была выполнена с помощью языка программирования Python.

Python – высокоуровневый язык программирования общего назначения, который ориентирован на повышение производительности разработчика, поддерживает функциональное, структурное, императивное и объектно-ориентированное программирование. Его разработка была начата в конце 1980-х годов сотрудником голландского университета CWI Гвидо ван Россумом. Python продолжает активно развиваться, новые версии с изменением или обновлением языковых свойств выходят раз в два года. Данный язык программирования обладает рядом преимуществ:

- является интерпретируемым, что значительно упрощает отладку программы;
- поддержка модульности, возможность написать свой модуль и использовать его в других программах;
- кроссплатформенность позволяет программе, написанной на Python, одинаково функционировать на различных операционных системах;
- динамическая типизация;
- большое количество стандартных и сторонних модулей, обеспечивающих дополнительные возможности.

Главным недостатком этого языка программирования является относительно невысокая скорость выполнения программы из-за ее интерпретируемости.

Для автоматизации алгоритма расчета механических характеристик стали и термообработки необходимо подключение дополнительных модулей (библиотек).

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		49

NumPy – библиотека языка Python с открытым исходным кодом, обеспечивающая поддержку многомерных массивов и матриц. Также предоставляет возможность реализации вычислительных алгоритмов в виде высокоуровневых математических функций, оптимизированный для работы с многомерными массивами.

В выпускной работе библиотека «NumPy» используется для вычисления математических выражений. Функция «NumPy.log(x)» позволяет вычислить натуральный алгоритм (x), где x принадлежит всем элементам входного массива. Для реальных входных типов данных «NumPy.log(x)» всегда возвращает реальный результат. Для каждого значения, которое не может быть выражено как действительное число или бесконечность, оно возвращает «NaN» и устанавливает недопустимый флаг ошибки с плавающей запятой. «NaN» – одно из состояний числа с плавающей запятой. Данное состояние может возникнуть, если математическая операция была выполнена с неопределенным результатом или в ячейку памяти добавилось число, которое не удовлетворяет условиям.

На рисунке 3.2 приведен пример выполнения функции «NumPy.log(x)».

```
import numpy as np # импортируем библиотеку NumPy
in_array = [1,2,3,4] # вводим входной массив
out_array = np.log(in_array) # находим натуральные логарифмы значений во входном массиве
print ("Входной массив : ", in_array) # выводим входной массив
print ("Выходной массив: ", out_array) # выводим выходной массив
```

Входной массив : [1, 2, 3, 4]
Выходной массив: [0. 0.69314718 1.09861229 1.38629436]

Рисунок 3.2 – Пример выполнения функции «NumPy.log(x)»

Для обработки и анализа данных необходима программная библиотека «Pandas» на языке Python. Работа «Pandas» является высокоуровневой и строится над библиотекой «NumPy». Данный пакет является мощным инструментом для анализа данных, который предоставляет специальные операции для

манипулирования числами и специальные структуры. В возможности библиотеки «Pandas» входит:

- построение сводных таблиц и переформатирование наборов данных;
- выполнение различных группировок;
- предоставляет удобный доступ к данным из таблиц;
- имеет инструменты для обмена данными между файлами различных форматов и структурами в памяти,
- при наличии специального пакета «matplotlib» дает возможность изображать графики по полученным наборам данных.

Основная область применения этой программной библиотеки – обеспечение работы в среде Python для моделирования и анализа данных, для их сбора и очистки, без переключения на более специфичные языки для статистического анализа, такие, как язык программирования R.

Для эффективной работы с «Pandas» необходимо знать главные структуры данной библиотеки: Series и DataFrame. Series – это объект, одномерный массив значений, имеющий ассоциированные метки, индексы, вдоль каждого элемента из списка. DataFrame – это проиндексированный многомерный массив значений, являющийся табличной структурой данных, в которой каждый столбец является объектом Series, а строки – их непосредственными элементами.

Для работы и анализа данных необходимо их загрузить. Библиотека «Pandas» представляет разнообразный выбор источников информации, такие как: текстовые файлы, Excel файлы, HTML и SQL.

Функция «Pandas.read_excel()» позволяет загрузить Excel файл для дальнейшей работы с данными, записанными в него. Пример загрузки файла Excel приведен на рисунке 3.3. Данная функция поддерживает такие расширения файлов, как xls , xlsx , xlsxm , xlsb и odf. Считывание происходит из локальной файловой системы или с помощью URL-адреса. Также поддерживает возможность загрузки одного листа или списка листов файла. После функции в

скобках необходимо указать путь файла, его имя и требуемые параметры к его считыванию.

Библиотека «Pandas» позволяет выполнять различные действия с набором данных, такие, как объединение, фильтрация, добавление столбцов или строк, построение сводных таблиц. После загрузки данных появляется возможность их исследовать.

```
# импортируем библиотеку Pandas
import pandas as pd

# загружаем файл Excel
DataFrame = pd.read_excel('C:\\Code\\prepared_data.xlsx', index_col=0)

# функция возвращает первые n строк
DataFrame.head(4)
```

	Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	...	Параметр закалки	Ac1	Ac3
0	32г2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	...	810.626512	735.0	795.0
1	32г2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	...	810.626512	735.0	795.0
2	32г2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	...	810.626512	735.0	795.0
3	32г2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	...	810.626512	735.0	795.0

4 rows x 30 columns

Рисунок 3.3 – Пример загрузки файла Excel

Это можно сделать с помощью следующих атрибутов, которые есть у любого DataFrame:

- DataFrame.shape – выводит количество строк и колонок загруженной таблицы;
- DataFrame.columns – выводит название всех столбцов;
- DataFrame.index – выводит название всех строк;
- DataFrame.dtypes – выводит тип данных, находящихся в каждой колонке.

Результат применения этих атрибутов к загруженному ранее DataFrame приведен на рисунке 3.4.

В «Pandas» существуют функции для агрегации данных. С помощью функции «DataFrame.merge()» можно объединить данные из набора двух таблиц. В качестве параметра функция принимает набор данные, которые будут присоединены к исходным, тип соединения и поле, по которому оно происходит. Данная библиотека является альтернативой MS Excel, но более удобна при работе с большим объемом данных.

```

DataFrame.shape #выводит количество строк и колонок загруженной таблицы
(1899, 30)

DataFrame.columns #выводит название всех столбцов
Index(['Сталь', 'C', 'Mn', 'Si', 'S', 'P', 'Cr', 'Ni', 'Cu', 'Mo', 'V', 'Nb',
      'Ti', 'Al', 'N', 'O', 'B', 'Сэв', 'Тнагрева', 'время выдержки, мин',
      'Параметр закалки', 'Ac1', 'Ac3', 'V800-500 °C/с', '%Ф', '%П', '%Б',
      '%М', '%А остаточный', 'HV'],
      dtype='object')

DataFrame.index #выводит название всех строк
Int64Index([ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
            ...,
            1889, 1890, 1891, 1892, 1893, 1894, 1895, 1896, 1897, 1898],
            dtype='int64', length=1899)

DataFrame.dtypes #выводит тип данных, находящихся в каждой колонке
Сталь      object
C          float64
Mn         float64
Si         float64
S          float64
P          float64

```

Рисунок 3.4 – Результат применения атрибутов исследования данных DataFrame

Для визуального анализа данных в работе была использована библиотека «Matplotlib», которая представляет собой модуль-пакетов для языка программирования Python.

«Matplotlib» – библиотека двумерной графики, с помощью которой появляется возможность создавать высококачественные рисунки разных форматов. Она состоит из множества модулей, которые, в свою очередь, наполнены иерархически связанными между собой классами и функциями. Для

того, чтобы нарисовать рисунок достаточно вызвать всего одну команду «Matplotlib.pyplot.figure()», несмотря на то, что это делается с помощью нескольких функций, встроенных в модуль.

Интерфейс этой библиотеки – набор команд и функций, которые делают синтаксис похожим на команды, которые используются в среде MATLAB.

Главным объектом самого верхнего уровня «Matplotlib» является figure (рисунок), на котором располагаются одна или несколько Axes (областей рисования), (рисунок), на котором располагаются одна или несколько Axes (областей рисования), элементы рисунка Artists (легенда, заголовки) и Canvas (основа).

Интерфейс pyplot позволяет выбрать уже готовые решения и настроить базовые параметры рисунка. Изображения создаются путем последовательного вызова команд в интерактивном режиме с помощью консоли или в текстовом файле с Python-кодом.

Пример построения гистограммы с помощью интерфейса «matplotlib.pyplot» изображен на рисунке 3.5.

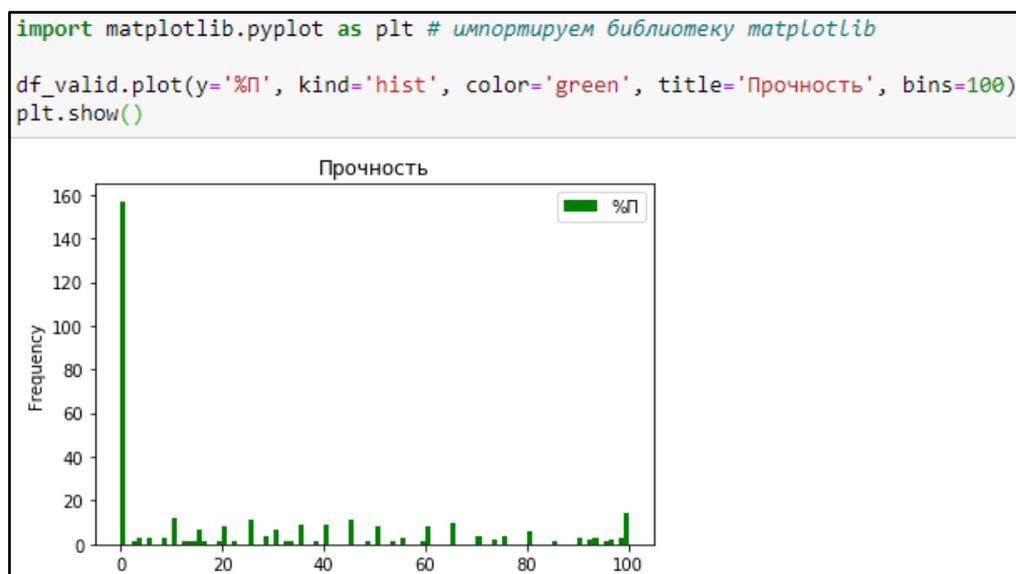


Рисунок 3.5 – Пример построения гистограммы с помощью библиотеки «Matplotlib»

Для работы с библиотекой необходимо сначала ее импортировать, затем переходить к выполнению требуемой задачи. На рисунке 2.11 приняты обозначения: «df.valid» – таблица используемых данных, «у» – название столбца, данные которого необходимо отразить на графике, «kind» – вид графика (гистограмма), «color» – цвет отображения, «title» – название графика, «bins» – диапазон значений. После указания необходимых параметров построения графика, вызываем функцию «Matplotlib.pyplot.show» для отображения гистограммы.

Для удобства работы многие типы графиков могут быть объединены в одну фигуру, с целью создания более гибкого представления данных (см. рисунок 3.6).

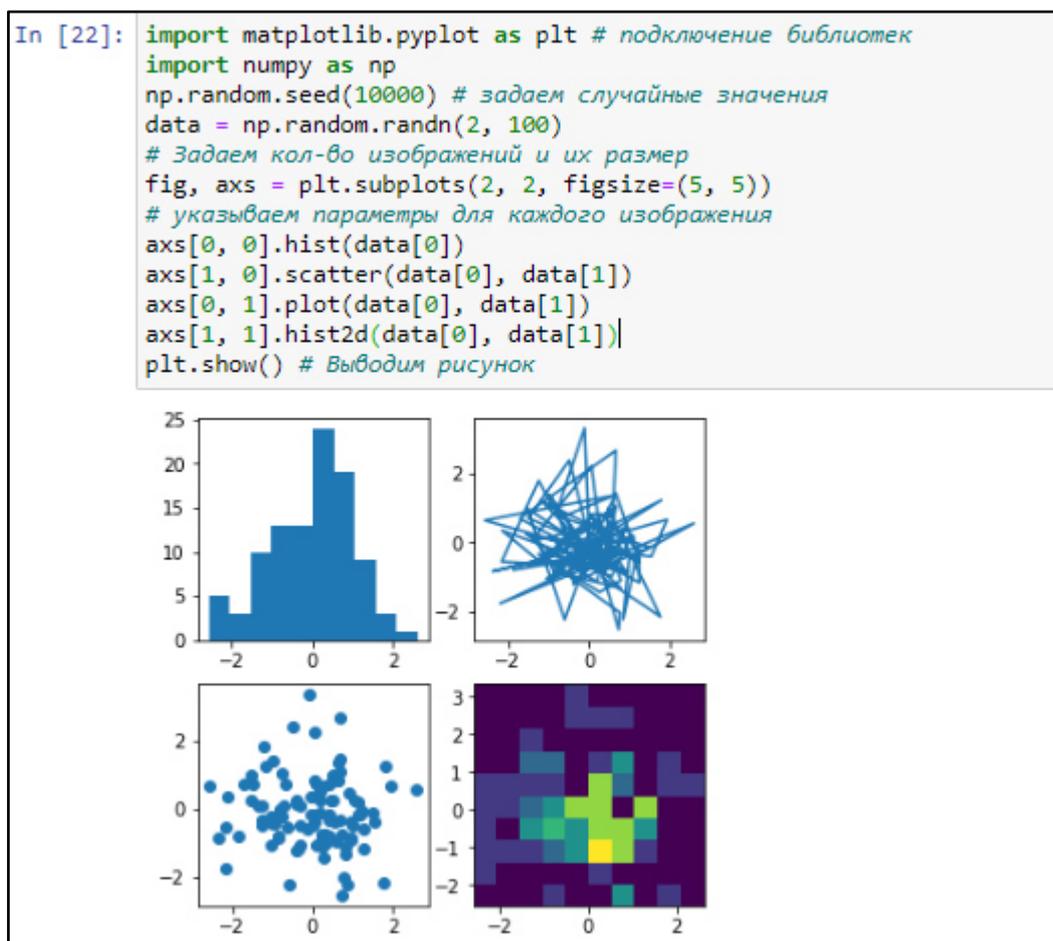


Рисунок 3.6 – Пример объединения нескольких типов графиков в одну фигуру

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	N	O	твёрдость закалки (HRC)
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					28,0768608
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					28,3602091
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					31,7603891
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					35,7272657
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					44,2277156
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					45,9278056
32г2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					46,4945023
32г2	0,36	1,4	0,3	0,025	0,019	0	0	0	0	0	0					27,7935125
32г2	0,36	1,4	0,3	0,025	0,019	0	0	0	0	0	0					28,0768608

Рисунок 3.8 – Фрагмент исходных данных для автоматизации алгоритма

Приступить к расчетам с помощью языка программирования Python можно только после загрузки необходимых нам библиотек (см. рисунок 3.9).

```
# Подключаем необходимые библиотеки
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Рисунок 3.9 – Подключение необходимых библиотек для автоматизации алгоритма

Затем загружаем Excel файл с данными о закалки стали, указав его место хранения и имя (см. рисунок 3.10), узнаем его размер (см. рисунок 3.11).

Из рисунка 3.11 делаем вывод, что загруженный файл Excel с данными о плавках после закалки имеет следующий размер: 1899 строк и 17 столбцов.

После этого можно переходить к методу расчета, подробное описание которого представлено в пункте 2.2.

```
# Загружаем данные
df = pd.read_excel('C:\\Code\\Данные закалки.xlsx', index_col=0)
# Выводим первые 10 строк загруженного файла
df.head(3)
```

	Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	N	O	твердость закалки (HRC)
0	32r2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	27.226816
1	32r2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	27.226816
2	32r2	0.32	1.1	0.27	0.02	0.017	0.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	27.226816

Рисунок 3.10 – Загрузка данных стали после закалки

```
df.shape # Выводим размер файла
(1899, 17)
```

Рисунок 3.11 – Вывод информации о размере файла

Первым шагом необходимо найти идеальный критический диаметр (DI). Для этого напишем функцию «get_DI (df_)», включающую в себя все необходимые выражения для получения искомой величины. На вход подадим исходный файл, на выходе получим значение идеального критического диаметра для каждой плавки. Функция с помощью цикла переберет каждую из плавок, рассчитает коэффициент умножения для всех элементов, входящих в состав стали, а затем величину (DI). Результат выполнения приведен на рисунке 3.12.

На рисунке 3.12 указана длина полученного столбца, он равен количеству исходных плавок, что говорит об успешном выполнении функции. Также выведен тип переменных «float64» – число двойной точности.

Затем необходимо найти значение начальной твердости стали (H) и твердость при 50 % распаде мартенсита (M). Функция «get_IH (df_)» принимает на вход исходный файл данных, а возвращает два искомых значения (см. рисунок 3.13).

поместим их все в один общий список (DFS1). Фрагмент результата выполнения приведен на рисунке 3.14.

Для того, чтобы построить кривую закаливанию найдем твердость стали после закаливанию в каждом моменте расстояния от охлаждаемого торца по формуле (10) из пункта 2.3. Значения расстояния Джомини (расстояния от охлаждаемого торца), откладываемое по оси абсцисс на графике кривой закаливанию общепринятое и равно списку целых чисел [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20,24,28,32].

```
DFS1
[[1.061431943693775,
1.2205904752144199,
1.6105159532891944,
1.9547102727640597,
2.2390288183777187,
2.342610108005028,
2.436157388669642,
2.539501656291357,
2.6505486435371486,
2.908464611707362,
3.018299218895507,
3.1277376069263645,
3.316743431782756,
3.446116744586499,
3.7237293993698923,
3.9631744718477386,
4.047485572403258],
[1.061431943693775,
```

Рисунок 3.14 – Фрагмент результата выполнения функции «get_DFS(DI)»

Функция «get_HRCq (H, DFS1)» принимает значения начальной твердости (H), список значений коэффициентов деления (DFS1) и возвращает список значений твердости после закалки в каждом положении расстояния Джомини (HRC1). Результат выполнения функции «get_HRCq (H, DFS1)» приведен на рисунке 3.15.

Когда все величины для построения графика кривой закаливанию найдены, можно его построить.

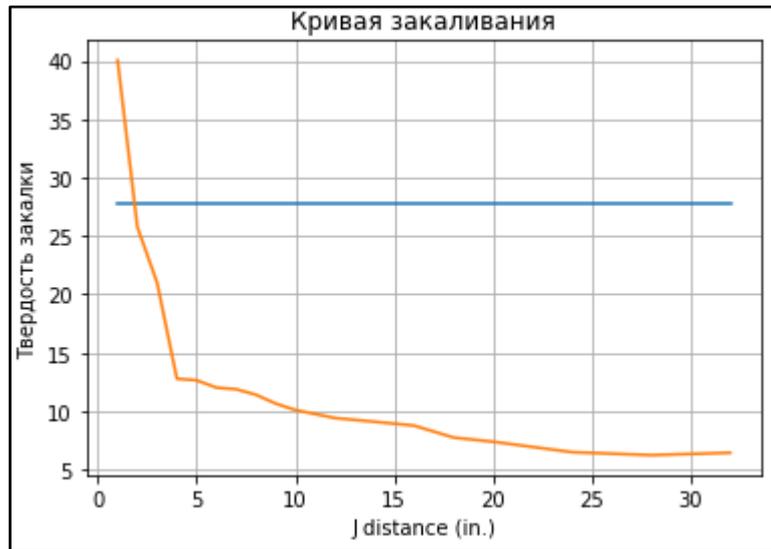


Рисунок 3.16 – График кривой закаливания для одной из плавков

На рисунке 3.16 по оси ординат отложены значения твердости стали после закаливания, а по оси абсцисс расстояние от охлаждаемого торца. Прямая принимает величину твердости при 50 % распаде мартенсита.

Затем, для дальнейшей реализации алгоритма, необходимо привести длительность отпуска к 1 часу. Тогда температура, задаваемая при отпуске, изменится, так как является зависимой величиной. Сделаем это с помощью функции «temper_time (T1, t)», где принимаемые на вход величины T1 и t – это исходная температура и время, соответственно. На выходе получим температура отпуска с длительностью 1 час (см. рисунок 3.17).

```
T1=700 #задается температура отпуска
t= 1.5 #задается время отпуска
def temper_time(T1,t):
    return ((T1+273)*(20+np.log(t))/(20+np.log(1)))-273 # температура отпуска длительностью 1 час (T2)
T2 = temper_time(T1,t)
print(temper_time(T1,t))

719.7258775094622
```

Рисунок 3.17 – Пример выполнения функции «temper_time (T1, t)»

Из рисунка 3.17 видно, что изначальная температура отпуска (T_1) была равна $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а время отпуска (t) равно 1,5 часа. После выполнения функции и приведения длительности отпуска к 1 часу, температура стала равна $719,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После этого можно перейти к нахождению таких величин, как степень закалки (S), фактора (K) и непосредственно твердости после отпуска (HRC).

Для определения значения степени закалки необходимо знать максимальное и номинальное значение твердости стали закаливания. Номинальная твердость стали была известна и приведена в исходных данных «твердость закалки (HRC)». А максимальное значение твердости и степень закалки найдем с помощью функции « $\text{get_S}(\text{HRC}_q, \text{HRC}_{\text{max}})$ », где HRC_q – номинальная твердость закалки, HRC_{max} – максимальная.

Чтобы найти фактор (K) воспользуемся функцией « $\text{get_K}(T_2, E_d, S)$ », где T_2 – температура отпуска, приведенная к отпуску длительностью 1 час; E_d – расстояние Джомини, S – степень закалки. Данная функция возвращает значение фактора (K) для каждой плавки.

Функция « $\text{get_HRC}_t(K)$ » рассчитывает твердость стали после отпуска, принимая значение фактора (K), рассчитанного ранее.

В результате мы получаем исходную таблицу с новым добавленным столбцом «твердость отпуска (HRC)», со значениями твердости стали после отпуска.

Теперь необходимо сохранить полученные результаты в новом Excel файле, указав его путь сохранения на компьютере и имя (см. рисунок 3.18).

```
df.to_excel('C:\\Code\\результат.xlsx')
```

Рисунок 3.18 – Сохранение результатов в Excel файле

Проверим полученные результаты, открыв новый файл Excel (см. рисунок 3.19).

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	N	O	твердость закали (HRC)	твердость отпуска (HRC)
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158	39,79156069
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158	39,79156069
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					27,2268158	39,79156069
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					28,0768608	39,36306058
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					28,36020913	39,22127567
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					31,7603891	37,56152413
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					35,72726573	35,72438652
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					44,22771565	32,15141261
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					45,92780563	31,49557563
32r2	0,32	1,1	0,27	0,02	0,017	0,23	0	0	0	0	0					46,49450229	31,28122682
32r2	0,36	1,4	0,3	0,025	0,019	0	0	0	0	0	0					27,79351247	40,11300924

Рисунок 3.19 – Фрагмент Excel файла с сохраненными результатами

3.3 Автоматизация расчета предела прочности стали после отпуска

Существует стандартная таблица перевода твердости стали в предел прочности. Но в ней содержатся не все возможные значения, что делает перевод неточным. В этой связи, на основе табличных представленных значений определим аналитический вид зависимости с использованием линейной регрессии. В языке программирования Python сделать это возможно с помощью библиотеки машинного обучения «Scikit-learn».

Для выполнения данной задачи необходимо загрузить требуемые библиотеки (см. рисунок 3.20).

```
# Загрузка библиотек
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import numpy as np
```

Рисунок 3.20 – Подключение необходимых библиотек

Стандартную таблицу перевода твердости отпуска в предел текучести для дальнейшей работы с ней, необходимо представить в виде таблицы в Excel файле, где HRC – твердость стали после отпуска (см. рисунок 3.21).

Следующим шагом загружаем файл с найденной твердостью стали после отпуска и таблицу перевода, указав место хранения и имя (см. рисунок 3.22).

Затем необходимо загрузить модель линейной регрессии и обучить ее (см. рисунок 3.23).

После обучения проверим зависимость переменных друг от друга.

HRC	прочность
59	2420
58	2330
57	2240
56	2160
55	2070
54	2010
53	1950
52	1880
51	1820
50	1760

Рисунок 3.21 – Фрагмент таблицы перевода в Excel файле

```
#загружаем файл с найденной твердостью стали после отпуска
data = pd.read_excel ('C:\\Code\\результат.xlsx')
# загружаем файл с таблицей перевода
df = pd.read_excel('C:\\Code\\твердость в прочность.xlsx')
# выводим первые 3 строки таблицы перевода
df.head(3)
```

	HRC	прочность
0	59	2420
1	58	2330
2	57	2240

Рисунок 3.22 – Загрузка необходимых для работы файлов

```
# Загружаем модель линейной регрессии
model = LinearRegression()
# Обучаем модель
model.fit(x,y)
model = LinearRegression().fit(x,y)
```

Рисунок 3.23 – Загрузка и обучение модели линейной регрессии

Для этого найдем коэффициент детерминации модели зависимости случайной величины (y) от факторов (x) (см. рисунок 3.24).

Коэффициент детерминации данной модели равен 0,948. Это значит, что расчетный параметр объясняет зависимость между изучаемым на 94,8 %.

```
r_sq = model.score(x,y)
print('Коэффициент детерминации:',r_sq)
Коэффициент детерминации: 0.9487700562098342
```

Рисунок 3.24– Вывод параметра модели

Убедившись, что модель работоспособна и имеет хорошую зависимость между параметрами, можно приступить к работе с ней. Для этого необходимо загрузить данные, на основе которых будет совершаться предсказание параметров предела твердости (см. рисунок 3.25).

```
# Выбираем столбец значений для факторов модели
# из файла с найденной твердостью после отпуска
x =np.array(data['твердость отпуска (HRC)'].values)
x = x.reshape((-1,1))
```

Рисунок 3.25 – Загрузка необходимых данных в модель

Затем применяем обученную модель на наши данные из таблицы и получаем искомую величину – предел прочности стали после отпуска. Сохраняем эти значения в файл Excel «Результат», указав путь сохранения и его имя. Теперь проверим выполнение данных команд, открыв данный файл (см. рисунок 3.26).

Получив результат, сохраним найденные величины в новый столбец «твёрдость отпуска (HRC)» в файл Excel, указав его место хранения и имя (см. рисунок 4.3).

```
df.to_excel('C:\\Code\\тест.xlsx')
```

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	N	O	твёрдость закалки (HRC)	HRC отпуска	Прочность	Текучесть	твёрдость отпуска (HRC)
15crni6	0,13	0,51	0,31	0,009	0,023	1,5	1,55	0	0,06	0	0		0,01			31	29	899	131	28,182374
18crni8	0,16	0,5	0,31	0,014	0,013	1,95	2,02	0	0,03	0,01	0		0,03			27	30	992	144	30,4943048
25mocrc4	0,27	0,67	0,2	0,022	0,017	0,5	0,11	0	0,45	0	0		0,034	0,005		25	34	1099	160	33,1093878
stE47 NiTi	0,17	1,45	0,55	0,017	0,016	0	0,74	0	0	0	0	0,18	0,055			40	25	786	114	25,4408278
20NiMoCr6	0,2	0,62	0,15	0,02	0,015	0,47	1,58	0	0,48	0	0		0,015			26	31	1037	150	31,6208452
35X	0,35	0,65	0,23			1,11	0,23	0	0	0	0					51	25	779	113	25,2546011

Рисунок 4.3 – Фрагмент Excel файла с полученными результатами

Следующим шагом загружаем файл с найденной твёрдостью стали после отпуска и с помощью обученной модели линейной регрессии предсказываем величину предела прочности. Получив необходимые данные, сохраним значения в исходный файл, добавив новый столбец «прочность» (см. рисунок 4.4).

```
df.to_excel('C:\\Code\\тест.xlsx')
```

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	N	O	твёрдость закалки (HRC)	HRC отпуска	Прочность	Текучесть	твёрдость отпуска (HRC)	прочность
15crni6	0,13	0,51	0,31	0,009	0,023	1,5	1,55	0	0,06	0	0		0,01			31	29	899	131	28,182374	897,7069
18crni8	0,16	0,5	0,31	0,014	0,013	1,95	2,02	0	0,03	0,01	0		0,03			27	30	992	144	30,4943048	992,0406
25mocrc4	0,27	0,67	0,2	0,022	0,017	0,5	0,11	0	0,45	0	0		0,034	0,005		25	34	1099	160	33,1093878	1098,744
stE47 NiTi	0,17	1,45	0,55	0,017	0,016	0	0,74	0	0	0	0	0,18	0,055			40	25	786	114	25,4408278	785,8436
20NiMoCr6	0,2	0,62	0,15	0,02	0,015	0,47	1,58	0	0,48	0	0		0,015			26	31	1037	150	31,6208452	1038,007
35X	0,35	0,65	0,23			1,11	0,23	0	0	0	0					51	25	779	113	25,2546011	778,245

Рисунок 4.4 – Фрагмент Excel файла с полученными результатами

Предел текучести стали после отпуска найдем по аналогии определения величины предела прочности. Загрузим файл Excel с данными о плавках и обученную модель линейной регрессии для прогноза предела текучести. Выполнив необходимые преобразования, получим искомую величину. Сохраним в новый столбец «текучесть» в файл Excel. Результат сохранения представлен на рисунке 4.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод автоматизации расчета механических характеристик стали и термообработки. Данные параметры являются важными при производстве труб различного назначения. Их определение, в основном, происходит опытным путем с помощью проведения специальных исследований и отбора проб, что является разрушающим видом контроля качества. После отбора проб трубное изделие приходит в негодность и, как правило, отправляется на переработку, что приводит к дополнительным затратам производства. В опытно-промышленных партиях отсутствуют конкретные значения параметров производства, поэтому возрастает количество брака, что существенно сказывается на себестоимости продукции.

В работе рассмотрены методы определения механических характеристик стали термообработки, реализуемые как опытным, так и расчетным способом. В основу автоматизации расчета положен метод, предложенный хорватским профессором и доктором наук В. Smoljan. Данный способ базируется на нахождении твердости стали после отпуска на основании известных данных о твердости стали после закаливания.

Автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки выполнена на основе языка программирования Python с использованием специальных библиотек машинного обучения, вычисления математических выражений, обработки и анализа данных.

На основе разработанного программного обеспечения проведены расчеты искомых величин – механических характеристик: твердость стали после отпуска, предел прочности и текучести, с использованием тестовых данных. Анализ полученных результатов показал, что погрешность расчетных характеристик составляет 1–2 %. Это свидетельствует о возможности применения данного метода расчета на производстве с использованием разработанного программного обеспечения.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		73

Разработанное программное обеспечение расчета механических характеристик в настоящее время внедрено в опытно-промышленную эксплуатацию.

Использование программного обеспечения позволит сократить количество неликвидной продукции в опытно-промышленных партиях, а также количество лабораторных исследований. Автоматизированный расчет позволит провести анализ создания партий, основанных на технических условиях заказчика, и улучшить его качество без дополнительных издержек.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		74

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Группа ЧТПЗ. – <https://chelpipe.ru/>
- 2 Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 646 с.
- 3 Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для студентов вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд.– М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
- 4 Лахтин, Ю.М. Материаловедение и термическая обработка металлов: учебник для студентов вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Металлургия, 1984. – 360 с.
- 5 Мозберг, Р.К. Материаловедение: учебник для студентов вузов / Р.К. Мозберг. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 448 с.
- 6 Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
- 7 Политехнический словарь / гл. ред. И.И. Артоболевский. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 608 с.
- 8 Физическое материаловедение: справ.: в 3 т. / под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена. – М.: Металлургия, 1987. – Т. 1. – 640 с.
- 9 Общая классификация и обозначение металлов и сплавов: методические указания для самостоятельной работы / сост. Т.Ю. Малеткина. – Томск: Изд. ТГУ, 2015. – 40 с.
- 10 Основы материаловедения (металлообработка): учебник / под ред. В.Н. Заплатина, – 8-е изд., стер. – М.: Изд. Академия, 2017. – 272 с.
- 11 Геллер, Ю.А. Материаловедение / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.
- 12 Зуев, В.М. Термическая обработка металлов / В.М. Зуев. – М.: Высш. шк., 2001. – 288 с.
- 13 Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин. – М.: Высш. шк., 2001. – 638 с.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		75

14 Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин. – 2-е изд. – М.: Изд-во МИСиС, 2001. – 663 с.

15 Богодухов, С.И. Курс материаловедения в вопросах и ответах / С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 2014. – 352 с.

16 Сапунов, С.В. Материаловедение: учебное пособие / С.В. Сапунов. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2015. – 208 с.

17 Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. – 2-е изд. – СПб.: Химиздат, 2014. – 639 с.

18 Буслаева, Е.М. Материаловедение: учебное пособие / Е.М. Буслаева. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2012. – 148 с.

19 ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения по Бринеллю. – М.: Стандартиформ, 2007. – 40 с.

20 Дегтярев, М.Г. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М.Г. Дегтярев. – М.: Колос, 2007. – 360 с.

21 Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с.

22 Оськин, В.А., Материаловедение. Технология конструкционных материалов / В.А. Оськин, В.В. Евсиков. – М.: Колос, 2007. – 447 с.

23 Ординарцев, И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.И. Филиппов, А.Н. Шевченко. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.

24 ГОСТ 9013–59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.

25 ASTM A370–17. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. – USA.: ANSI, 2017. – 49 p.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		76

26 Чукин, М.В. Определение механических свойств высокопрочных и сверхпрочных сталей по твердости / М.В. Чукин, П.П. Полецков, М.С. Гущина, Г.А. Бережная // Вестник МГТУ. – 2016. – Вып. 1 – №1 (41) – С. 21–27.

27 Бабич, В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

28 Стародубов, К.Ф. Изменение пластических свойств стали при отпуске. / К.Ф. Стародуб, В.К. Бабич. – Укр.: Днепропетровск, 1957. – 132 с.

29 Стародубов, К.Ф. Механические характеристики стали / К.Ф. Стародуб, В.К. Бабич // Черная металлургия. – 1958. Вып. 4. – № 2. – С. 133.

30 Бабич, В.К. Материаловедение / В.К. Бабич, В.А. Пирогов, А.В. Бережной // Черная металлургия. – 1969. Вып. 3. – №2. – С. 78.

31 Бабич, В.К. Упрочняющая термическая обработка проката / В.К. Бабич, А.Г. Сердюк. – М.: Изд-во металлургия, 1966. – 105 с.

32 Коджаспиров, Г.Е. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий деформированием. / Г.Е. Коджаспиров, А.И. Рудской, В.В. Рыбин. – СПб: Наука, 2006. – 350 с.

33 Биронт, В.С. Теория термической обработки металлов. Отжиг: учебное пособие / В.С. Биронт. – Красноярск: ИЦМиЗ, 2007. – 234 с.

34 Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение: Техника, 1980. – 304 с.

35 Стоев, П.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости / П.И. Стоев, В.И. Мощенок // Вестник ХФТИ. – 2003. – Вып. 2. – № 3 (12). – С. 10–24.

36 Smoljan, V. Mathematical modelling of mechanical properties of quenched and tempered steel / V. Smoljan, F. Traven // J. Am. Ceram. Soc. – 2013. – V. 64, №3. – P. 110–132.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		77

37 Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: ИКЦ Академкнига, 2007. – 398 с.

38 Рааб, Г.И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов: автореферат дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук / Г.И. Рааб. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2009. – 36 с.

39 Махутов, Н.А. Механические свойства конструкционных материалов, прочность и безопасность машин / Н.А. Махутов. – М.: Металлургия, 1999. – 45 с.

40 Вовк, Л.П. К определению комплекса механических характеристик неоднородных материалов ударным вдавливанием индентора / Л.П. Вовк // Заводская лаборатория. – 2003. – № 1. – С. 45–48.

41 Шабанов, В.М. Связь кривой деформационного упрочнения и диаграммы вдавливания сферического индентора / В.М. Шабанов // Заводская лаборатория. – 2002. – № 9. – С. 62–64.

42 Бакиров, М.Б. Определение свойств вязкоупругих материалов методом динамического индентирования / М.Б. Бакиров, В.А. Рудницкий, А.И. Кононенко // Заводская лаборатория. – 2001. – № 2. – С. 38–42.

43 Бакиров, М.Б. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М.Б. Бакиров, В.В. Потопов // Заводская лаборатория. – 2000. – № 12. – С. 35–44.

44 Ботвин, К.В. Автоматизированное определение прочностных характеристик материалов / К.В. Ботвин, О.П. Максимкин // Заводская лаборатория. – 1998. – № 8. – С. 40–42.

45 Кравченко, А.Ф. Основные концепции развития оборудования для механических испытаний / А.Ф. Кравченко, В.Г. Кирпичников // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 11. – С. 21–22.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		78

46 Артемьев, Ю.Г. Контактный динамический метод контроля твердости / Ю.Г. Артемьев // Заводская лаборатория. – 1998. – № 4. – С. 12–19.

47 Нургалиев, Р.К. Учебный программный комплекс. Автоматизированная система управления предприятием / Р.К. Нургалиев, А.А. Гайнуллина, Д.А. Рыжов. – М.: Наука, 2012. – 306 с.

48 Благовещенская, М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами / М.М. Благовещенская. – М.: Высшая школа, 2005. – 100 с.

49 Рачков, М.Ю. Технические средства автоматизации: учебник / М.Ю. Рачков. – М.: МГИУ, 2006. – 185 с.

50 Харазов, В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами / В.Г. Харазов. – СПб.: Изд-во профессия, 2009. – 591 с.

51 ГОСТ 19675–74. Автоматизированные системы управления. Основные положения, термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 23 с.

52 Втюрин, В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП / В.А. Втюрин. – СПб.: Изд-во профессия, 2015. – 365 с.

53 Закер, К.К. Компьютерные сети. Модернизация и поиск неисправностей / К.К. Закер. – СПб.: Петербург, 2003. – 184 с.

54 Олифер, В.Г. Компьютерные сети: учебник / В.Г. Олифер, Н.А.Олифер. – СПб.: Питер, 2001. – 238 с.

55 Жеретинцева, Н.Н. Курс по компьютерным сетям / Н.Н. Жеретинцева. – Владивосток: Изд-во ВГУ, 2000. – 165 с.

56 Панфилов, И.В. Архитектура ЭВМ и систем: учебное пособие / И.В. Панфилов, А.М. Заяц. – СПб.: Питер, 2003. – 215 с.

57 Панфилов, И.В. Информационные сети: учебное пособие / И.В. Панфилов, С.П. Хабаров, А.М. Заяц. – СПб.: Питер, 2003. – 58 с.

58 Рачков, М.Ю. Компьютерные сети: учебник / М.Ю. Рачков. – М.: МГИУ, 2005. – 145 с.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		79

70 Lina, Y. Neural network prediction of hardness in HAZ of temper bead welding using the proposed thermal cycle tempering parameter / Y. Lina, S. Masoto // ISIJ. Soc. – 2011. – V. 51, №9. P. 1506–1515.

71 Линейные регрессионные модели / сост. О.В. Любимцев, О.Л. Любимцева. – Нижний Новгород: Изд. ННГАСУ, 2016. – 45 с.

72 Ермолаева, В.И. Регрессионные математические модели / В.И. Ермолаева, С.И. Банников // Вестник УГСА. – 2007. – № 2(5). – С. 39-41.

73 Кабаков, Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных на языке R / Р.И. Кабаков. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 481 с.

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		81

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы расчета механических характеристик стали и термообработки

Листинг А.1 – Программа «Нахождение твердости стали после отпуска»

```
# Подключение библиотек

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Загрузка данных

df =pd.read_excel('C:\\Code\\Данные.xlsx',index_col=0)
# Вывод первых 10 строк загруженного файла
df.head(3)

# Вывод размера файла
df.shape

# Функция нахождения параметра DI

def get_DI(df_):
    df = df_.copy()
    for i in df.index:
        c = df.loc[i, 'C']
        d_c={1: lambda c: 0.54*c,
            2: lambda c: 0.171+0.001*c+0.265*c*c,
            3: lambda c: 0.115+0.268*c -0.038*c*c,
            4: lambda c: 0.143+0.2*c,
            5: lambda c: 0.062+0.409*c-0.135*c*c}
        if c<=0.39:
            C = d_c[1](c)
        elif 0.39<c<=0.55:
            C = d_c[2](c)
        elif 0.55<c<=0.65:
            C = d_c[3](c)
        elif 0.65<c<=0.75:
            C = d_c[4](c)
        elif 0.75<c<=0.9:
            C = d_c[5](c)

        mn = df.loc[i, 'Mn']
        if mn<=1.2:
```

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		82

Продолжение листинга А.1

```
MN = 3.3333*mn+1
elif 1.2<mn<=1.95:
    MN = 5.10*mn-1.12

si = df.loc[i, 'Si']
if si < 2:
    SI=(1+0.7*si)

ni = df.loc[i, 'Ni']
if ni < 2:
    NI=(1+0.363*ni)

cr = df.loc[i, 'Cr']
if cr < 1.75:
    CR=(1+2.16*cr)

cu = df.loc[i, 'Cu']
if cu < 0.55:
    CU=(1+0.365*cu)

v = df.loc[i, 'V']
if v < 2:
    V=(1+0.73*v)
df.loc[i, 'DI'] =C*MN*SI*NI*CR*CU*V
return df['DI']
DI = get_DI(df)

# Функция нахождения параметров IH, M

def get_IH(df_):
    df =df_.copy()
    for i in df.index:
        Cx= df.loc[i, 'C']
        df.loc[i, 'IH'] = 35.395+6.990*Cx+312.330*Cx**2-
        -821.744*Cx**3+1015.479*Cx**4-538.346*Cx**5
        df.loc[i, 'M'] =22.974+6.214*Cx+356.364*Cx**2-
        -1091.488*Cx**3+1464.880*Cx**4-750.441*Cx**5
    return df['IH'].copy(), df['M'].copy()
IH, M = get_IH(df)

# Функция нахождения параметра DF

def get_DFS(DI):
    DFS=[]
    DFS1=[]
    v = 0
```

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		83

Продолжение листинга А.1

```
DFS.append(DF)
if DI[i]<=5.6:
    DF=4.44473-1.79085*DI[i]+ 0.24617*DI[i]**2+
    +0.03378*DI[i]**3-0.01189*DI[i]**4+0.00084*DI[i]**5
    v+=1
else:
    DF=1
    v+=1
DFS.append(DF)
if DI[i]<=5.8:
    DF=4.95421-2.43521*DI[i]+ 0.62983*DI[i]**2-
    -0.07914*DI[i]**3+0.00399*DI[i]**4-0.00001*DI[i]**5
    v+=1
else:
    DF=1
    v+=1
DFS.append(DF)
if DI[i]<=6.1:
    DF=5.31610-2.80977*DI[i]+ 0.84183*DI[i]**2-
    -0.141781*DI[i]**3+0.01301*DI[i]**4-0.00051*DI[i]**5
    v+=1
else:
    DF=1
    v+=1
DFS.append(DF)
if DI[i]<=6.6:
    DF=5.63649-2.89264*DI[i]+0.90309*DI[i]**2-
    -0.17297*DI[i]**3+0.01881*DI[i]**4-0.00086*DI[i]**5
    v+=1
else:
    DF=1
    v+=1
DFS.append(DF)
if DI[i]<7:
    DF=5.83176-2.99646*DI[i]+0.94088*DI[i]**2-
    -0.17734*DI[i]**3+0.01839*DI[i]**4-0.00079*DI[i]**5
    v+=1
    DFS.append(DF)
    DF=6.06952-3.15198*DI[i]+0.99297*DI[i]**2-
    -0.18010*DI[i]**3+0.01720*DI[i]**4-0.00066*DI[i]**5
    v+=1
    DFS.append(DF)
    DF=7.26492-4.50566*DI[i]+1.61688*DI[i]**2-
    -0.31738*DI[i]**3+0.03146*DI[i]**4-0.00122*DI[i]**5
    v+=1
    DFS.append(DF)
    DF=7.68728-4.90380*DI[i]+1.81034*DI[i]**2-
    -0.36593*DI[i]**3+0.03739*DI[i]**4-0.00150*DI[i]**5
    v+=1
    DFS.append(DF)
```

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		85

Продолжение листинга А.1

```
DF=9.19586-6.71331*DI[i]+2.77208*DI[i]**2-
-0.61510*DI[i]**3+0.06814*DI[i]**4-0.00295*DI[i]**5
v+=1
DFS.append(DF)
DF=9.27904-6.21461*DI[i]+2.33158*DI[i]**2-
-0.46972*DI[i]**3+0.04727*DI[i]**4-0.00186*DI[i]**5
v+=1
DFS.append(DF)
DF=8.62857-5.16125*DI[i]+1.81214*DI[i]**2-
-0.35489*DI[i]**3+0.03569*DI[i]**4-0.00143*DI[i]**5
v+=1
DFS.append(DF)

DFS= [float(item) for item in DFS]
J=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20,24,28,32]
J= [int(item) for item in J]

if v >= 17:
    v = 0
    DFS1.append(DFS)
    DFS =[]

return DFS1
DFS1 = get_DFS(get_DI(df))

# Функция возвращает список значений твердости в других
положениях для каждой плавки

def get_HRCq(IH,DFS1):
    HRCq=[]
    HRC1=[]
    for DFS in DFS1:
        for i in df.index:
            HRCq.append(IH[i])
            for j in DFS:
                HRCq.append((IH[i])/j)
            HRCq= [float(item) for item in HRCq]
            HRC1.append(HRCq)
            HRCq=[]
    return HRC1
HRC1=get_HRCq(IH,DFS1)

# Список значений оси ординат кривой закаливания

J=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20,24,28,32]
J= [int(item) for item in J]
```

Продолжение листинга А.1

Функция нахождения расстояние от точки пересечения до ОУ в мм

```
def is_intersection(x1_1, y1_1, x1_2, y1_2, M):
    x2_1 = 1
    y2_1 = M
    x2_2 = 32
    y2_2 = M
    A1 = y1_1 - y1_2
    B1 = x1_2 - x1_1
    C1 = x1_1*y1_2 - x1_2*y1_1
    A2 = y2_1 - y2_2
    B2 = x2_2 - x2_1
    C2 = x2_1*y2_2 - x2_2*y2_1

    if B1*A2 - B2*A1 and A1:
        y = (C2*A1 - C1*A2) / (B1*A2 - B2*A1)
        Ed = (-C1 - B1*y) / A1
        if min(x1_1, x1_2) <= Ed <= max(x1_1, x1_2):
            return Ed
        else:
            return False
    elif B1*A2 - B2*A1 and A2:
        y = (C2*A1 - C1*A2) / (B1*A2 - B2*A1)
        Ed = (-C2 - B2*y) / A2
        if min(x1_1, x1_2) <= Ed <= max(x1_1, x1_2):
            return Ed
        else:
            return False
    else:
        return False
ED_list = list()

# Вывод номера плавки без пересечения (в случае наличия)

for q,j in enumerate(HRC1):
    k1=0
    k2=1
    k3=0
    k4=1
    for i in range (0, len(j)-1):
        y1_1=j[k1]
        y1_2=j[k2]
        x1_1=J[k3]
        x1_2=J[k4]
        Ed = is_intersection(x1_1, y1_1, x1_2, y1_2, M[q])*25.4
        if Ed !=0.0:
            ED_list.append(Ed)
            break
        else:
```

Окончание листинга А.1

```
k1+=1
k2+=1
k3+=1
k4+=1
if k1>= len(j)-1:
    print(q)

T1=700 #задается температура отпуска
t= 1.5 #задается время отпуска
# Функция приведения длительности отпуска к 1 часу
# Возвращает температуру отпуска длительностью 1 час (T2)

def temper_time(T1,t):
    return ((T1+273)*(20+np.log(t))/(20+np.log(1)))-273
T2 = temper_time(T1,t)

# Функция нахождения параметра S
def get_S (HRCq, HRCmax):
    return HRCq/HRCmax

# Функция нахождения параметра K
def get_K (T2, Ed, S):
    return np.exp(((T2+273)/808.69)**6.7484*S**1.1821*Ed**-0.3232)

# Функция нахождения твердости стали после отпуска
def get_HRCt(K):
    HRCt=( (HRCq-HRCmin)/K)+HRCmin
    return HRCt

HRCmax=IH
for HRC in HRC1:
    HRCq = df['твердость закалки (HRC)']
    S=get_S (HRCq, HRCmax)
for i in range (len(ED_list)):
    Ed= ED_list[i]
    K = get_K (T2, Ed, S)
for HRC in HRC1:
    HRCmin = min(HRC)
    HRCq=max(HRC)-1
    HRCt=get_HRCt(K)

# Добавление значений твердости в новый столбец файла
df['твердость отпуска (HRC)'] = HRCt

# Сохранение результатов в файл Excel
df.to_excel('C:\\Code\\результат.xlsx')
```

										Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата						88

27.03.04.2020.366 ПЗ

Листинг А.2 – Программа «Нахождение предела прочности стали после отпуска»

```
# Загрузка библиотек
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import numpy as np

#загрузка файла с найденной твердостью стали после отпуска
data = pd.read_excel ('C:\\Code\\результат.xlsx')

# загрузка файл с таблицей зависимости прочности от твердости
df = pd.read_excel('C:\\Code\\твердость в прочность.xlsx')

# вывод первых 3 строк таблицы зависимости
df.head(3)

# Задание значения случайной величины и фактора
x =np.array(df.HRC.values)
y =np.array(df.прочность.values)
x = x.reshape((-1,1))

# Загрузка модели линейной регрессии
model = LinearRegression()

# Обучение модели
model.fit(x,y)
model = LinearRegression().fit(x,y)

# нахождение коэффициента детерминации и его вывод
r_sq = model.score(x,y)
print('Коэффициент детерминации:', r_sq)

# Выбир столбца значений из файла с найденной твердостью стали после
отпуска для факторов модели
x =np.array(data['твердость отпуска (HRC)'].values)
x = x.reshape((-1,1))

# Предсказание значений с помощью обученной модели
l = model.predict(x)

# Выбор столбца в файле для сохранения значений
data['Прочность'] = l

# Сохранение результатов в файл Excel
data.to_excel('C:\\Code\\результат.xlsx')
```

										Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата						89

27.03.04.2020.366 ПЗ

Листинг А.3 – Программа «Нахождение предела текучести стали после отпуска»

```
# Загрузка библиотек
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import numpy as np

#загрузка файла с найденной твердостью стали после отпуска
data = pd.read_excel ('C:\\Code\\результат.xlsx')

# загрузка файл с таблицей зависимости текучести от твердости
df = pd.read_excel('C:\\Code\\твердость в текучесть.xlsx')

# вывод первых 3 строк таблицы зависимости
df.head(3)

# Задание значения случайной величины и фактора
x =np.array(df.твердость.values)
y =np.array(df.текучесть.values)
x = x.reshape((-1,1))

# Загрузка модели линейной регрессии
model = LinearRegression()

# Обучение модели
model.fit(x,y)
model = LinearRegression().fit(x,y)

# нахождение коэффициента детерминации и его вывод
r_sq = model.score(x,y)
print('Коэффициент детерминации:', r_sq)

# Выбир столбца значений из файла с найденной твердостью стали после
отпуска для факторов модели
x =np.array(data['твердость отпуска (HRC)'].values)
x = x.reshape((-1,1))

# Предсказание значений с помощью обученной модели
l = model.predict(x)

# Выбор столбца в файле для сохранения значений
data['Текучесть'] = l

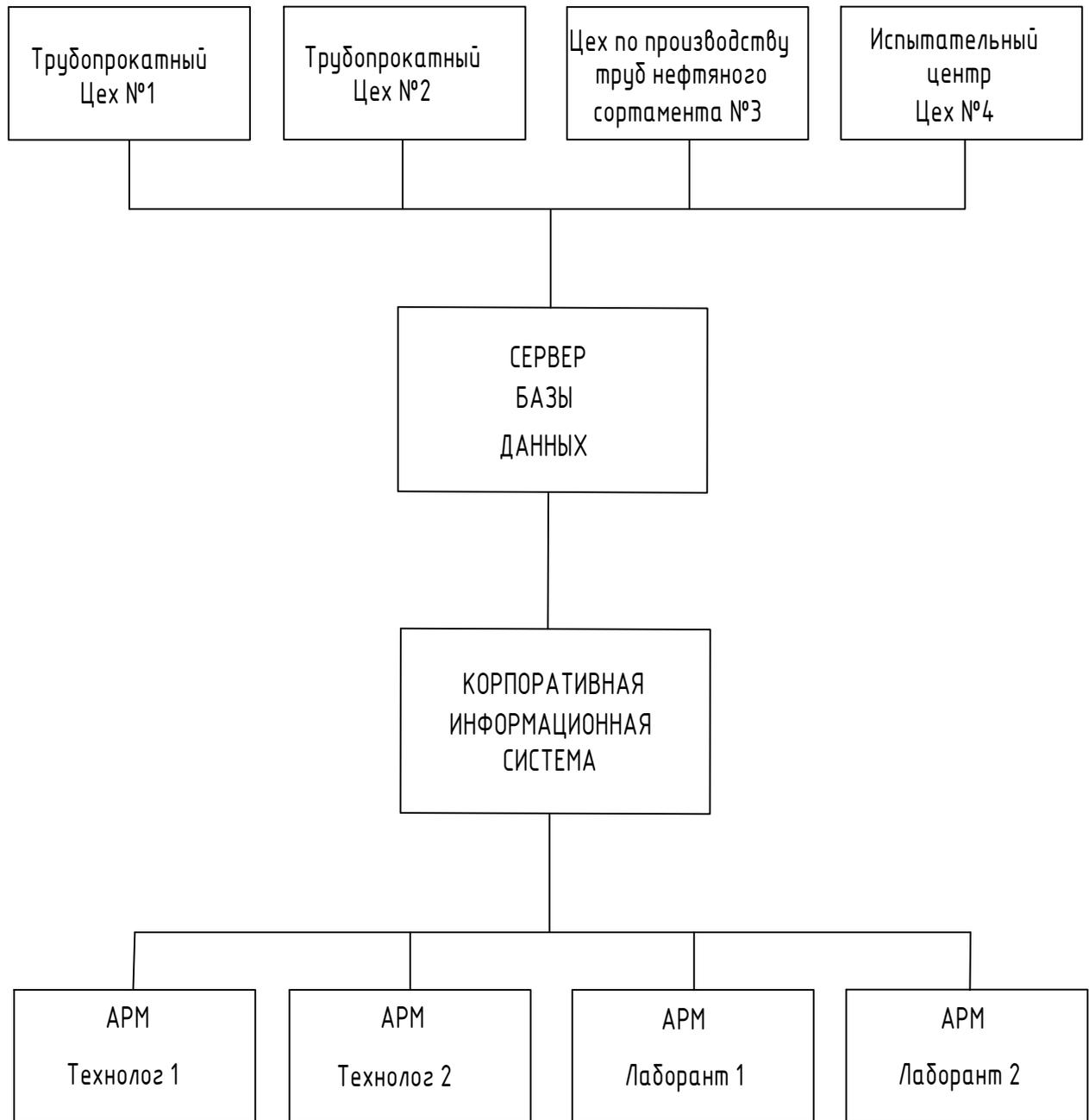
# Сохранение результатов в файл Excel
data.to_excel('C:\\Code\\результат.xlsx')
```

					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		90

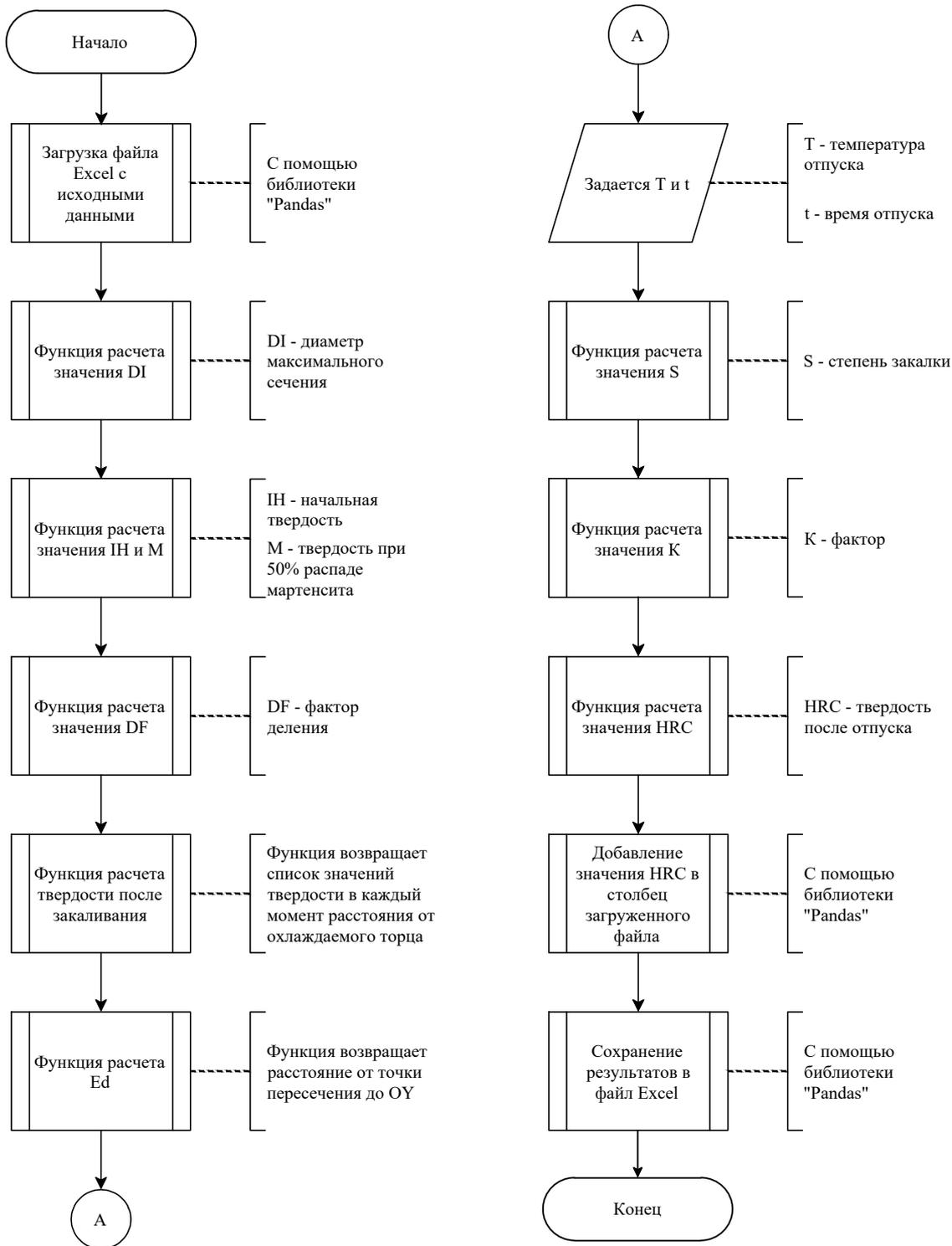
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Схемы и чертежи

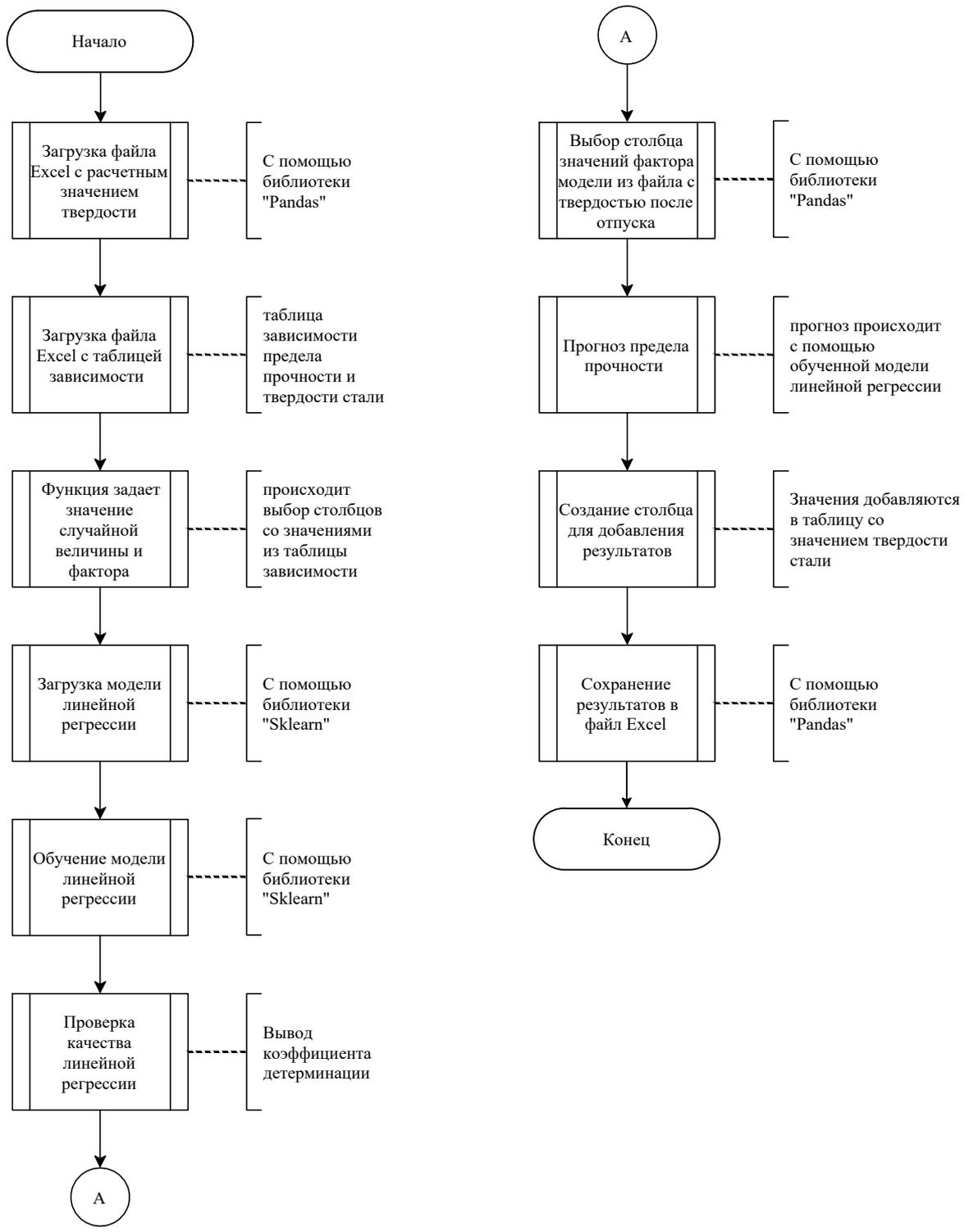
					27.03.04.2020.366 ПЗ	Лист
Изм.	Лист.	№ докум.	Подпись	Дата		91



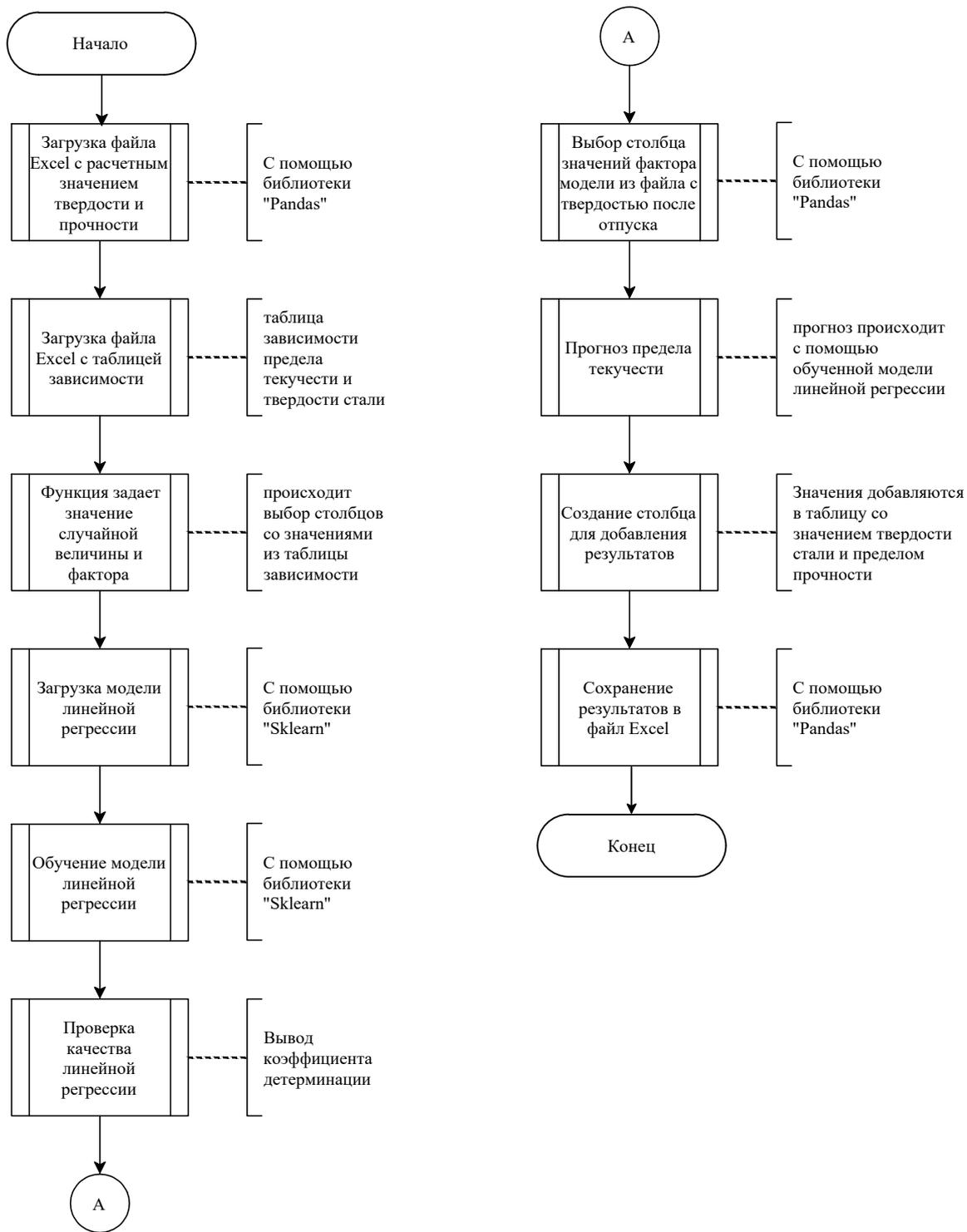
					27.03.04.2020.366.01 С1			
					Автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки			
Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата				
					АСУ ТП "ЧТПЗ" Структурная схема	Стадия	Лист	Листов
Разработал	Бобрик					Р	1	4
Проверил	Колесникова							
Н.контр.	Бардасова							
Утв.	Казаринов					ФГАОУ ВО ЮУрГУ "НИУ"		



					27.03.04.2020.366.02 Д22			
					Автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки			
Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата				
Разработал	Бобрик				Расчет твердости стали после отпуска Блок-схема	Стадия	Лист	Листов
Проверил	Колесникова					р	2	4
Н.контр.	Бардасова					ФГАОУ ВО ЮрГУ "НИУ"		
Утв.	Казаринов							



					27.03.04.2020.366.03 Д22			
					Автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки			
Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата				
Разработал	Бобрик				Расчет прочности стали после отпуска Блок-схема	Стадия	Лист	Листов
Проверил	Колесникова					р	3	4
Н.контр.	Бардасова					ФГАОУ ВО ЮрГУ "НИУ"		
Утв.	Казаринов							



					27.03.04.2020.366.04 Д22			
					Автоматизация расчета механических характеристик стали и термообработки			
Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата				
					Расчет текучести стали после отпуска Блок-схема	Стадия	Лист	Листов
Разработал	Бобрик					р	4	4
Проверил	Колесникова							
Н.контр.	Бардасова							
Утв.	Казаринов					ФГАОУ ВО ЮУрГУ "НИУ"		