

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное автономное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт

Факультет «Заочный»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Г.Г. Михайлов
_____ 2019 г.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРУЖИН ИЗ СТАЛИ 60С2А

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ - 220402.2019.026 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.ф-м.н., доцент

_____ В.Л. Ильичев
_____ 2019 г.

Автор работы
студент группы ПЗ – 343

_____ В.А. Аршавка
_____ 2019 г.

Нормоконтролер,
к.ф-м.н., доцент

_____ В.Л. Ильичев
_____ 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	9
1.1 Условия работы пружин	9
1.2 Требования, предъявляемые к материалам для изготовления пружин	13
1.3 Характеристики стали 60С2А	21
1.4 Зарубежные аналоги стали 60С2А	27
1.5 Термическая обработка пружин	27
2 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ	40
2.1 Анализ возможного вида брака и меры по его предотвращению	45
3 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ	47
4 РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ДЕТАЛИ	57
5 ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	68

ВВЕДЕНИЕ

Пружина – деталь машины или механизма, служащая для временного накопления энергии за счет упругой деформации под влиянием нагрузки. По прекращении действия нагрузки пружина отдает накопленную энергию и восстанавливает свою первоначальную форму.

Актуальность данной работы заключается в том, что пружина является широко распространенной и незаменимой деталью во всех отраслях машиностроения. Пружины широко применяются в железнодорожном транспорте, автомобилестроении, машиностроении, приборостроении и других отраслях [1].

В силовом отношении пружины представляют собой детали высоко напряженные. Погрешности, допущенные при проектировании и изготовлении пружин, приводят к серьезным поломкам дорогостоящих машин и агрегатов. Пружина – одна из немногих деталей, хорошо поддающихся расчету, так как в силу сравнительной простоты конструкции, аналитические зависимости с достаточной достоверностью отображают реальные условия ее работы.

Пружины используются в машинах и приборах в качестве силовых элементов, обеспечивающих действие необходимых усилий на определенных участках пути (предохранители и др.), амортизаторов, предназначенных для восприятия энергии удара и последующего рассеивания ее в виде затухающих колебаний, аккумуляторов энергии как источники движения (пружинные двигатели), чувствительных элементов, изменяющих свои размеры пропорционально приложенной нагрузке (силоизмерители).

Технология изготовления пружин играет важную роль и имеет большое значение для их бесперебойной долгосрочной эксплуатации. Упругие элементы – это высокотехнологичные изделия, требующие наличия квалификации и опыта от инженеров-конструкторов и технологов, а также

хорошего парка оборудования на предприятии-производителе [2].

От того, насколько правильными были расчеты пружины, подбор материала с учетом требуемых характеристик и особенностей ее применения, а также используемые технологии и точность изготовления, зависит работа целого агрегата, где эта деталь будет комплектующей.

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Условия работы пружин

Общими потребительскими требованиями к конструкционным сталям являются наличие у них определенного комплекса механических свойств, обеспечивающего длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации, и хороших технологических свойств. Необходимые технологические и потребительские свойства конструкционных сталей и сплавов, в основном, обеспечиваются рациональным выбором химического состава, улучшением металлургического качества, соответствующей термической обработкой и поверхностным упрочнением [1].

Пружины испытывают в работе многократные знакопеременные нагрузки и после снятия нагрузки должны полностью восстанавливать свои первичные размеры. Пружина должна иметь сквозную прокаливаемость, поскольку испытывает напряжение сжатия. В связи с такими условиями работы металл, применяемый для изготовления пружин, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статичной, динамической или циклической нагрузок, достаточно хорошей пластичностью, высокими пределами упругости, выносливостью и высокой релаксационной стойкостью, а при работе в агрессивных средах (атмосфере пара, морской воде и др.) должен быть также и коррозионностойким.

Не менее важны для металла пружин также технологические свойства: малая склонность к росту зерна и обезуглероживанию в процессе термической обработки, глубокая прокаливаемость, низкая критическая скорость, малая чувствительность к отпускной хрупкости.

На качество пружин влияет состояние поверхности прутков, провода и полос, наличие внешних дефектов (трещин, раковин, заусенцев, окалины и др.), а также обезуглероженного слоя, который снижает упругие и циклические свойства металла. Многочисленными исследованиями установлено, что на долговечность работы пружин и рессор большое влияние

оказывает качество и чистота обработки поверхности. Риски, волосовины, царапины и другие дефекты поверхности недопустимы, поскольку они резко снижают работоспособность таких деталей. Поэтому внешние дефекты на поверхности прутиков и полос должны быть удалены зачисткой или шлифованием, а глубина обезуглероженного слоя не должна превышать определенную норму, установленную ГОСТом на рессорно-пружинную сталь.

Высокие свойства (максимальные пределы упругости и выносливости) пружины и рессоры имеют при твердости HRC 40-50 (структура – тростит отпуска), которая достигается после закалки (с равномерным и полным мартенситным превращением по всему объему металла) и среднего отпуска при 400-500 °С (в зависимости от стали) [13].

Функции, выполняемые пружинами, разнообразны. Их применяют:

- в тормозах, фрикционных передачах;
- для аккумуляции энергии с последующим использованием пружины как двигателя (например, часовые);
- для амортизации ударов и вибраций (рессоры, буферы);
- для возвратных перемещений клапанов, кулачковых механизмов.

Во всех этих случаях используют основное свойство пружины – по окончании действия на нее внешней силы возвращаться под действием внутренних сил упругости к своей первоначальной форме.

Упругие элементы в машинах и механизмах могут выполнять следующие функции:

- создавать постоянно действующие усилия (моменты), необходимые для силового замыкания кинематических пар (кулачковые механизмы, муфты фрикционные, кулачковые и др., стопоры, защелки и т.п.);
- обеспечивать беззазорность в кинематических парах механизмов с целью повышения их кинематической точности (например, в составных зубчатых колесах приборов);

- предохранять механизмы от воздействия чрезмерных нагрузок при ударах и вибрациях (рессоры, пружины, амортизаторы);
- накапливать энергию в процессе деформации под действием внешней нагрузки и отдавать ее для работы механизмов в процессе восстановления исходной формы (часовая пружина в механических часах, боевая пружина стрелкового оружия);
- выполнять преобразование силы в перемещение при использовании в качестве чувствительных элементов приборов (весоизмерительные приборы, приборы измерения давления, вакуумметры и т.п.)

Цилиндрические пружины с круглым сечением прутка имеют наибольшее применение в рессорном подвешивании вагонов. По сравнению с листовыми рессорами они позволяют получить необходимые упругие характеристики при меньших габаритах и массе, а в сочетании с гасителями колебаний могут обеспечить более спокойный ход вагона. Кроме того, пружины смягчают горизонтальные толчки и удары, а также проще и дешевле в изготовлении и ремонте, чем листовые рессоры [2].

Для витых цилиндрических пружин имеются следующие характерные показатели:

- количество витков;
- шаг витка;
- диаметр проволоки;
- предельно воспринимаемая нагрузка;
- также усталостные характеристики;

Основными параметрами пружин являются (рисунок 1):

- H_0 – длина пружины без зацепов в свободном состоянии;
- D_0 – диаметр поперечного сечения пружины;
- t – расстояние между соседними витками пружины;
- d – диаметр проволоки.

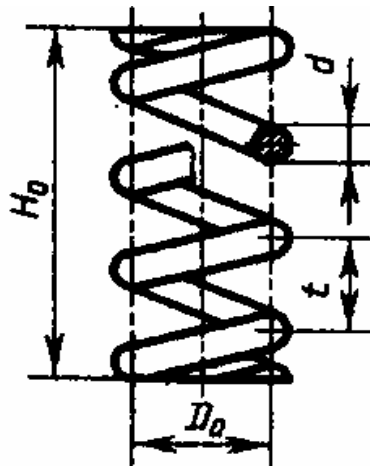


Рисунок 1 – Основные параметры пружин

Витая цилиндрическая пружина сжатия или растяжения, намотанная из цилиндрической проволоки и упруго деформируемая вдоль оси, имеет коэффициент жёсткости

$$k = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n}, \quad (1)$$

где d_D – диаметр проволоки;

d_F – диаметр намотки (измеряемый от оси проволоки);

n – число витков;

G – модуль сдвига (для обычной стали $G \approx 80$ ГПа, для меди ~ 45 ГПа).

Чтобы выполнять свою работу эффективно и правильно, эти элементы должны обладать хорошей прочностью, пластичностью, упругостью, выносливостью и релаксационной стойкостью [7].

Достижение этих качеств возможно при соблюдении многих факторов, в том числе:

- Правильном выборе материала.
- Грамотно проведенных расчетах.
- Соблюдении технологии изготовления.

Качественные пружины должны соответствовать требованиям ГОСТ и техническому заданию конкретного заказчика.

Согласно стандарту предусмотрены три группы точности по контролируемым деформациям:

- С допускаемым отклонениями до 5% (+/-).
- До 10%.
- До 20%.

В соответствии с этим определены три группы точности по геометрическим параметрам.

Важное требование к этим деталям – чистота поверхности, здесь не допускаются царапины и другие дефекты, так как они приводят к снижению прочности и надежности [9].

Особенности работы деталей типа упругих элементов состоят в том, что в них используют в основном упругие свойства стали и не допускают возникновения пластической деформации при нагрузке (статической, динамической, ударной). В связи с этим стали должны иметь большое сопротивление малым пластическим деформациям, т.е. высокие пределы упругости (текучести) и выносливости. Кроме того, важной характеристикой сталей данного типа является релаксационная стойкость [11].

Для обеспечения этих требований сталь должна иметь однородную структуру, которая обеспечивается хорошей закаливаемостью и сквозной прокаливаемостью (структура мартенсита по всему сечению детали после закалки). Наличие в структуре стали феррита, продуктов эвтектоидного распада, остаточного аустенита снижает упругие свойства детали. Известно, что сопротивление малым пластическим деформациям возрастает с уменьшением размера зерна стали.

1.2 Требования, предъявляемые к материалам для изготовления пружин

Материал для пружин должен удовлетворять комплексу разнообразных требований, продиктованных условиями работы и изготовления пружины. Это прежде всего высокие прочностные характеристики, дающие возможность проектировать пружины с минимальным весом и размерами. Поэтому желательно применение таких материалов, предел упругости

которых приближается к их временному сопротивлению.

Материал пружин, работающих при циклической и ударной нагрузке, должен обладать высоким пределом выносливости и ударной вязкостью. Все пружины независимо от характера воспринимаемой нагрузки должны длительно сохранять свою геометрию и характеристику, что обеспечивается релаксационной стойкостью материала. Это требование, равно как и требование максимального увеличения предела упругости, особенно важно при работе пружин в условиях температур (свыше 120 °С). Если пружина работает в агрессивных средах, материал должен обладать коррозионной стойкостью [12].

Требование к материалу, определяемые технологией изготовления пружины, включают в себя: достаточную пластичность (для осуществления навивки, штамповки, заневоливания), хорошую прокаливаемость (для равномерной термообработки по всему объему), отсутствие склонности к поверхностному обезуглероживанию при термообработке и т.д. Перечисленные требования в сочетании со степенью ответственности пружины и экономическими соображениями должны учитываться конструктором при назначении материала [13].

Для изготовления пружин применяется стальная углеродистая проволока, холоднотянутая проволока круглого сечения от 0,14 до 8 мм, стальная пружинная холоднокатаная лента, качественная рессорно-пружинная горячекатаная сталь, сплавы цветных металлов.

В тех случаях, когда диаметр проволоки превышает 8 мм либо к ней предъявляются какие-нибудь особые требования, применяют качественную рессорно-пружинную сталь, технические условия на которую регламентированы ГОСТ 14959-69. Навивку пружин из этой проволоки производят либо в холодном состоянии (в этом случае проволоку перед навивкой тщательно отжигают), либо в горячем (тогда предварительная термообработка не требуется). После навивки пружины подвергаются термообработке – закалке и отпуску.

Пружины и рессоры испытывают в работе многократные знакопеременные нагрузки и после снятия нагрузки должны полностью восстанавливать свои первоначальные размеры. В связи с такими условиями работы металл, применяемый для изготовления пружин и рессор, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статической, динамической или циклической нагрузки, достаточно хорошей пластичностью, высокими пределами упругости и выносливости и высокой релаксационной стойкостью, а при работе в агрессивных средах (атмосфере пара, морской воде и др.) должен быть также и коррозионностойким.

Для металла пружин и рессор важны также технологические свойства – малая склонность к росту зерна и обезуглероживанию в процессе термической обработки, высокая прокаливаемость, низкая критическая скорость закалки, малая чувствительность к отпускной хрупкости [14].

Для изготовления пружин применяют углеродистые и легированные стали, а для приборов – сплавы цветных металлов, главным образом бериллиевую бронзу. Рессоры изготавливают только из легированных сталей.

Широкое применение для изготовления рессор и пружин имеют стали 60С2А ГОСТ 14959-79, а также 50ХФА, 51ХФА, 60С2ХФА и аналогичные сплавы. Из нержавеющей самое широкое применение находит сталь 12Х18Н10Т.

Сталь 60С2А применяют для изготовления пружин, работающих при температурах до 250 °С.

Стали 60С2ХФА, 65С2ВА и 60С2Н2А используют для крупных пружин ответственного назначения. Детали из этих сталей малосклонны к росту зерна и прокаливаются в сечениях до 50 мм. Особенно высокими качествами обладает никелькремнистая сталь 60С2Н2А, легко отжигающаяся на структуру зернистого перлита, имеющая высокую пластичность, не подкаливающаяся при охлаждении на воздухе после горячей прокатки.

Наибольшее распространение в технике имеют винтовые пружины. Крупные винтовые пружины изготавливают из прутков диаметром более 12

мм, средние – из проволоки или прутков диаметром 1,5-12 мм. Мелкие пружины изготавливают из проволоки диаметром 0,2-1,5 мм.

В большинстве пружин материал работает на кручение, поэтому для расчета пружин используют модуль сдвига материала. Для оценки качества пружинных материалов используют испытания на растяжение [17].

При правильном выборе типоразмера пружин и рессор в соответствии с величиной и характером эксплуатационных нагрузок на их долговечность и надежность влияют следующие факторы:

- 1) Химический состав и структурное состояние стали после термической обработки, а также его изменение в процессе нагружения.
- 2) Металлургическое качество стали (содержание неметаллических включений, неоднородность состава и структуры).
- 3) Качество поверхности проката (листа, полосы, ленты, проволоки). Наличие дефектов поверхности, играющих роль концентраторов напряжений в готовых пружинах и рессорах.
- 4) Наличие и глубина обезуглероженного слоя.
- 5) Напряженное состояние, определяемое характером распределения и величиной внутренних остаточных напряжений.

Стали для пружин и рессор представляют собой специальную группу конструкционных сталей с характерным комплексом свойств, важнейшим из которых является сопротивление малым пластическим деформациям. Оно характеризуется условным пределом упругости, отвечающим появлению остаточной деформации 0,05 %. Величина предела упругости определяет предельные напряжения, которые не должны быть превышены в упругих элементах в процессе эксплуатации. Также к материалам пружин и рессор предъявляются требования:

- высокая релаксационная стойкость;
- наличие некоторой минимальной вязкости и прочности;
- высокий предел усталости;
- технологическая пластичность при горячей и холодной

пластической деформации.

По назначению рессорно-пружинные стали классифицируются на:

- стали общего назначения, используемые в качестве конструкционных материалов для работы в обычных атмосферных условиях;
- стали специального назначения для изготовления упругих элементов, работающих в особых условиях (коррозионно- и теплостойкие).

Основными способами упрочнения пружинных сталей являются:

- 1) Холодная пластическая деформация с последующим низкотемпературным нагревом (обработка “наклеп – отжиг”).
- 2) Закалка на мартенсит с последующим отпуском.
- 3) Закалка на пересыщенный твердый раствор с последующим старением.
- 4) Термомеханическая обработка.
- 5) Комбинированные обработки.

Пружины для работы в определенных условиях выбираются по типоразмерам с учетом характера и величины нагрузок, характерных для условий эксплуатации. Надежность работы этих деталей определяется многими факторами, в том числе – качеством и структурным состоянием металла после термической обработки, наличием остаточных внутренних напряжений. Кроме того, важно металлургическое качество стали. Долговечная беспроблемная эксплуатация начинается с выбора материала с определенным комплексом свойств.

Винтовые пружины сжатия в зависимости от размеров, выполняемой работы и других факторов изготавливаются из различных сталей, в том числе из конструкционных рессорно-пружинных, нержавеющей, других [16].

Пружины зачастую используются для гашения каких-либо типов нагрузок, сталь для изготовления пружин должна иметь очень высокие технические характеристики. В зависимости от предназначения итоговых изделий, для их создания могут использоваться самые различные марки стали. Однако, наиболее часто, производство пружин выполняется из

углеродистой и высоколегированной стали. Как правило, заводы-изготовители используют такие марки, как 50ХФА, 50ХГФА, 55ХГР, 55С2, 60С2, 60С2А, 60С2Н2А, 65Г, 70С3А, 70Г, а также ещё множество других стальных сплавов.

Среднеуглеродистые и высокоуглеродистые марки стали, а также низколегированные стальные сплавы, которые задействуют любое производство пружин, называются рессорно-пружинными. Зачастую, сталь для изготовления пружин обозначается еще как пружинная сталь. Стандартом для ее производства считают ГОСТ 14959-79, который предписывает все допуски и требования к техническим характеристикам. По Госстандарту, пружинная сталь должна иметь очень качественную поверхность без наличия каких-либо дефектов, способных привести к частичному или же полному разрушению.

При наличии трещин на поверхности изделий, в процессе их эксплуатации, при тяжелых различных условиях, все усталостные явления будут концентрироваться как раз в наименее устойчивых дефектных местах. Поэтому вся пружинная сталь до того, как началось непосредственное производство пружин, должна пройти процедуру проверки на соответствие установленным требованиям ГОСТ 14959-79. Кроме того, сталь для изготовления пружин должна иметь хорошую упругость и проявлять высокую устойчивость к агрессивным воздействиям [14].

Достичь этого помогает, во-первых, химический состав того или иного сплава, так как под конкретные рабочие условия подбирается конкретная сталь для изготовления пружин. Во-вторых, противостоять напряжению и разрушению позволяют процесс закалки и отпуска изделий. Проведение данных технологических процессов подразумевает любая технология изготовления пружин, однако для каждой марки стали есть свои нюансы. Этим нюансом является среда закаливания, в роли которой выступают масло или вода, а также еще и сама температура, при которой идет закаливание.

Температура при которой закаливается сталь для изготовления пружин,

варьируется в пределах от +800 °С до +900 °С, в зависимости от конкретного сплава. А отпуск проводится уже при диапазоне от +300 °С до +500 °С. Это обусловлено тем, что именно при подобных температурах возможно достичь одного из самых важных параметров пружинной стали – наибольшего предела упругости стали. Твердость получаемой продукции равняется HRC 40 – 50, что равнозначно значению от 1300 до 1600 кгс/мм²

Общая характеристика: сталь рессорно-пружинная, малочувствительна к флокенообразованию, склонна к отпускной хрупкости при содержании $Mn \geq 1\%$, не применяется для сварных конструкций. Плотность при 20 °С – $7,81 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Модуль нормальной упругости при 20 °С – 215 Гпа. Удельная теплоёмкость при 20 °С – 490 Дж/(кг·°С)

Они работают в области упругой деформации металла под воздействием циклических нагрузок. Поэтому они должны иметь высокое значение предела упругости, текучести, выносливости при необходимости пластичности и высоком сопротивлении хрупкому разрушению.

Пружинные стали содержат С = 0,5 - 0,75% , Si до 2,8%, Mn до 1,2%, Cr до 1,2%, V до 0,25%, Be до 1,2%, Ni до 1,7%. При этом происходит измельчение зерна, способствующее возрастанию сопротивления стали малым пластическим деформациям, а следовательно, ее релаксационной стойкости. Широкое применение на транспорте нашли кремнистые стали 55С2, 60С2А, 70С3А. Однако они могут подвергаться обезуглероживанию, графитизации, резко снижающим характеристики упругости и выносливости материала. Устранение указанных дефектов, а также повышение прокаливаемости и торможение роста зерна при нагреве достигается дополнительным введением в кремнистые стали хрома, ванадия, вольфрама и никеля. Для изготовления пружин также используют холодноотянутую проволоку (или ленту) из высокоуглеродистых сталей 65, 65Г, 70 и другие. Применяются также пружины специального назначения из мартенситных сталей 30Х13А, мартенситно – стареющих 03Х12Н10Д2Т, аустенитно – мартенситных 09Х15Н8Ю и других сталей и сплавов. Стали закаливают с

температур 800 – 900 °С и отпускают на тростит отпуска (300 – 500 °С) [14].

Для повышения усталостной прочности деталей, работающих при высоких колебательных нагрузках, необходимо обеспечить в поверхностном слое создание остаточных сжимающих напряжений. С этой целью применяют заневоливание пружин, заневоливание и чеканку торсионных валов, обкатку роликами, пластическую осадку и дробеструйную обработку. Легированная рессорно-пружинная сталь, термообработанная до твердости HRC 40 – 50, имеет предел усталости при кручении 190 МПа. После дробеструйной обработки предел усталости увеличивается до 350 МПа (3500 кгс/см²). Характеристики стали для изготовления пружин приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики стали для изготовления пружин

Марка сплава	Термический режим			Характеристики			
	Температура закалки	Среда закалки	Температура отпуска	σ _T	σ _B	δ	φ
65	840°С	Масло	480°С	80кгс/мм ²	100кгс/мм ²	10%	35%
70	830°С			85кгс/мм ²	105кгс/мм ²	9%	30%
75	820°С			90кгс/мм ²	110кгс/мм ²		
85				100кгс/мм ²	115кгс/мм ²		
60Г	840°С			80кгс/мм ²	100кгс/мм ²	8%	
65Г	830°С			80кгс/мм ²	100кгс/мм ²		
70Г				85кгс/мм ²	105кгс/мм ²	7%	25%
55ГС	820°С			80кгс/мм ²	100кгс/мм ²	8%	30%
50С2	860°С			Масло или вода	460°С	110кгс/мм ²	120кгс/мм ²
55С2		Масло	420°С			120кгс/мм ²	130кгс/мм ²
55С2А				140кгс/мм ²	160кгс/мм ²	20%	
60С2			460°С	160кгс/мм ²	180кгс/мм ²	25%	
60С2А			840°С	440°С	110кгс/мм ²	130кгс/мм ²	7%
70С3А		120кгс/мм ²					
50ХГ	830°С	450°С	125кгс/мм ²	140кгс/мм ²	5%	30%	
50ХГА			520°С	110кгс/мм ²	130кгс/мм ²	8%	35%
55ХГР	120кгс/мм ²	6%					
50ХФА	850°С	410°С	170кгс/мм ²	190кгс/мм ²	5%	20%	
50ХГФА			120кгс/мм ²	135кгс/мм ²	6%	30%	
60С2ХФА		520°С	170кгс/мм ²	190кгс/мм ²	5%	20%	
50ХСА			160кгс/мм ²	175кгс/мм ²	6%		
65С2ВА	880°С	420°С	160кгс/мм ²	180кгс/мм ²	5%	25%	
60С2Н2А				170кгс/мм ²	190кгс/мм ²		5%
60С2ХА				180кгс/мм ²	190кгс/мм ²		5%
60СГА	860°С	460°С	140кгс/мм ²	160кгс/мм ²	6%	25%	

Условные обозначения:

σ_T – предел текучести

σ_B – предел кратковременной прочности

δ – относительное удлинение при разрыве

φ – относительное сужение

1.3 Характеристики стали 60С2А

Выбираем сталь 60С2А, которая относится к широко используемым дешевым сталям для изготовления упругих элементов сечением до 18 мм. Эта рессорно-пружинная сталь обладает стойкостью к росту зерна, имеет высокие механические показатели. Для устранения склонности к обезуглероживанию нагрев под закалку следует проводить в контролируемой атмосфере [1].

Назначение – высоконагруженные пружины, торсионные валы, пружинные кольца, цанги, фрикционные диски и др.

Структурный класс – доэвтектоидная сталь

Класс по твердости и вязкости – высокой твердости

Класс по химическому составу – низколегированная сталь

Класс по качеству – высококачественная конструкционная.

Положительные свойства стали 60С2А:

- является недорогой по своим ценовым качествам.
- не флокеночувствительна и не склонна к хрупкости.
- сталь обладает выносливостью, а также вязкостью и упругостью.
- высокий предел усталости и умение воспринимать разного уровня ударные нагрузки.
- сталь кремнистая и способна работать в среде, где есть определенная норма влажности, не требуя покрытия
- максимальная температура эксплуатации такой стали достигает – 250°C.

Недостатки стали 60С2А:

- склонность к обезуглероживанию;

- склонность к графитообразованию;
- склонность к образованию поверхностных дефектов при горячей обработке стали.

Главным преимуществом стали данной марки является высокая степень упругости, которая подходит для того, чтобы создавать рессоры и пружины, которые впоследствии будут на себе испытывать большие нагрузки. Сталь 60С2А справляется с любыми нагрузками как с ударными, так и знакопеременными.

Из этой стали можно сделать много разных изделий. Так, это могут быть и пружинные кольца, и фрикционные диски, и торсионные валы, а также шайбы Гровера, но на первом месте стоит производство рессор и пружин, которые можно тяжело нагружать [2].

Большим спросом пользуется стальная проволока стали 60С2А, которая представляет собой легированную пружину. В ее составе основным элементом является кремний. Кроме кремния и углерода в состав стали 60С2А входит марганец и другие элементы. Такой состав стали 60С2А подходит для изготовления пружин и ей подобных изделий, которым потом приходится подвергаться высоким нагрузкам, которые обычно вызывают деформацию. Изготовление проволоки из стали 60С2А осуществляется по определенным стандартам и соответствует всем показателям ГОСТ.

На сегодняшний день существует два способа изготовления пружин. Первый метод – это горячая навивка, второй – холодная навивка. Вторым методом позволяет изготовить проволоку равную диаметром от 0,5 мм и до 12,0 мм. Пружинная проволока может иметь не только обычную точность, но и повышенный вариант точности.

Используется сталь 60С2А на машиностроительных заводах и фабриках. На предприятия стальная проволока из стали 60С2А поступает уже в определенном виде. Чаще всего это или моток, или пруток. Упругий и выносливый материал позволяет предприятиям изготавливать необходимые рессоры и пружины. Химический состав стали 60С2А приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав стали 60С2А, % масс. [3]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.58 - 0.63	1.6 - 2	0.6 - 0.9	до 0.25	до 0.025	до 0.025	до 0.3	до 0.2

Влияние легирующих элементов.

Чтобы сбалансировать свойства материала, получить одновременно противоположные характеристики (твердость и вязкость, прочность и коррозионную стойкость) снизить влияние примесей, от которых невозможно полностью избавиться, в состав стали 60С2А входят легирующие компоненты. Они позволяют нивелировать недостатки вносимые высоким количеством углерода. А в чем-то заменить его, получая даже более высокие результаты.

Углерод, определяет структуру и характеристики, повышенное содержание углерода приводит к хладноломкости, снижает вязкость. Углерод предопределяет не самый высокий предел устойчивости к ударным нагрузкам [17].

Кремний положительно влияет на структуру, механические и технологические свойства стали: снижает критическую скорость охлаждения и увеличивает прокаливаемость; уменьшает скорость распада мартенсита; сильно упрочняя феррит, повышает прочность, твердость и упругие свойства стали; увеличивает сопротивление коррозии; снижает вязкость. Такое влияние кремния на свойства связано с его воздействием на матричную фазу (α -раствор) и карбиды. Кремний способен создавать в твердом растворе направленные ионные связи, которые должны увеличивать напряжения, необходимые для движения дислокаций, особенно при малых пластических деформациях (упрочняющий эффект).

Марганец упрочняет феррит и повышает стабильность карбидов типа Me_3C , из-за чего происходит значительное повышение прочности и небольшое повышение вязкости; существенно увеличивается

прокаливаемость, а так же повышается чувствительность к перегреву.

Кремний совместно с марганцем взаимно дополняют друг друга в составе. Они совместно увеличивают прочность, выносливость и вязкость, но не дают развиваться причинам, приводящим к повышенной хрупкости сплава.

Хром растворяется в феррите и цементите, оказывая благоприятное воздействие на механические свойства стали: повышает прочность и вязкость (не значительно), а при термообработке хладостойкость; повышает температуру заковки и отпуска, значительно увеличивает прокаливаемость; уменьшает склонность к росту зерна при нагреве (из-за образования карбидов легирующих элементов повышенной устойчивости) [3].

Никель, является элементом, который повышает прочность, уменьшает размер зерна. Никель увеличивает коррозионную стойкость, повышает способность к термическому упрочнению, способствует увеличению вязкости и прочности.

Медь, повышает устойчивость к коррозии, увеличивает прочностные свойства. В более высоких концентрациях она приводит к выпадению интерметаллидов по границам зёрен, что существенно меняет механические свойства при отпуске.

Сера, является нежелательным элементом, повышение содержания серы увеличивает красноломкость, отрицательно влияет на пластичность, свариваемость и ударную вязкость.

Фосфор, ухудшает пластичность и вязкость, повышает склонность к хладноломкости. Однако повышенное содержание фосфора улучшает механическую обработку.

Таблица 3 – Температуры критических точек стали 60С2А, °С [3]

Ac1	Ac3	Ar3	Ar1	Mn
770	820	770	700	305

Таблица 4 – Прокаливаемость стали 60С2А [3]

Количество мартенсита, %	Твердость, HRC	Критический диаметр, мм	
		вода	масло
50	51-53	47-82	24-53
90	58-60	60	36

Изменение свойств стали 60С2А в зависимости от температуры отпуска приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 60С2А после закалки с температуры 850°С в масле [3]

Тотп, °С	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	KCU (Дж/см ²)	НВ
300	1960	2160	2	36	10	462
400	1470	1670	7	39	18	425
500	1080	1290	10	42	29	340
600	730	1030	17	48	-	298

На рисунке 2 показано влияние температуры отпуска на твердость стали 60С2А.

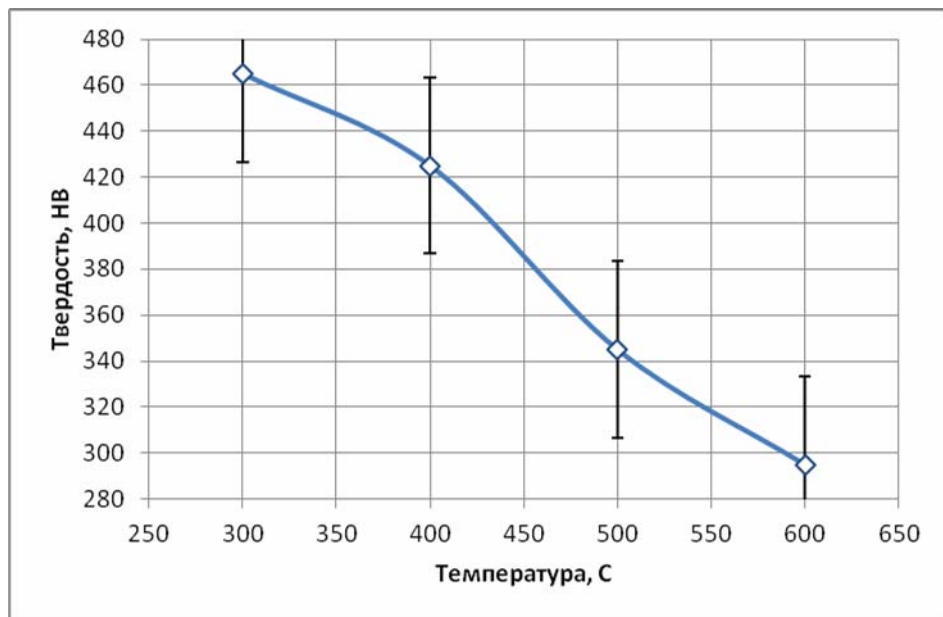


Рисунок 2 – Зависимость твердости стали 60С2А от температуры отпуска

Из рисунка 2 видно, что необходимые свойства пружины из стали 60С2А можно обеспечить, если применять термическую обработку: закалку с дальнейшим отпуском при температуре 430-470°C.

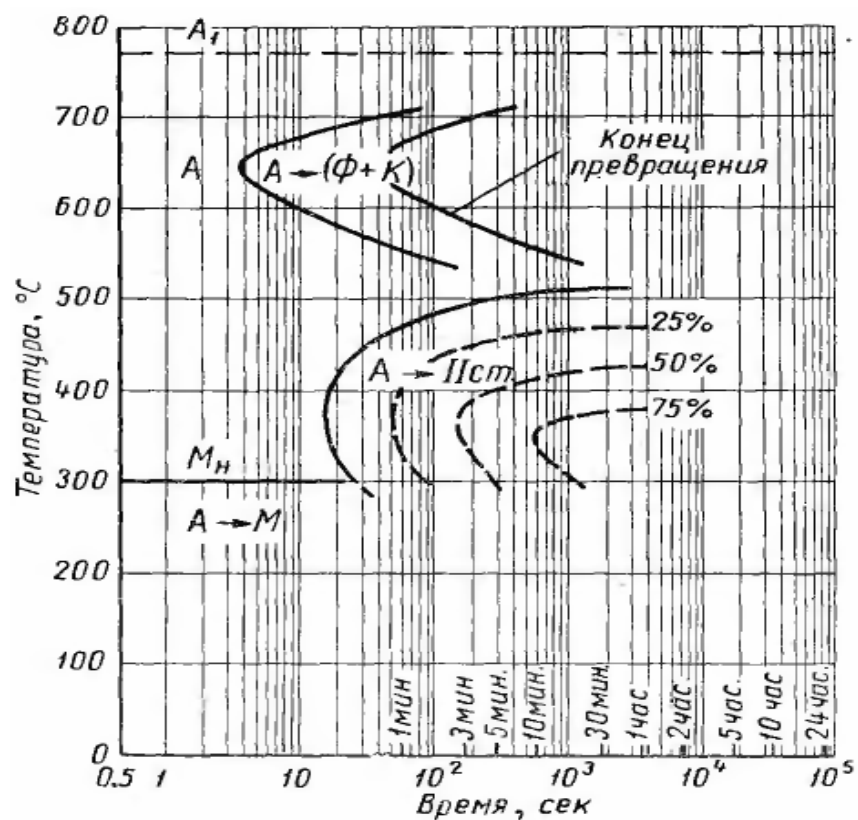


Рисунок 3 – Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 60С2А

1.4 Зарубежные аналоги стали 60С2А

Таблица 6 – Зарубежные аналоги стали 60С2А

США	Германия	Япония	Франция	Англия	Китай	Болгария	Польша
-	DIN, WNr	JIS	AFNOR	BS	GB	BDS	PN
9260 G92600	60MnSiCr4 60SiCr7 65Si7	SUP6 SUP7	61SiCr7	251H60	60Si2Mn	60S2A	60S2A

Главное различие отечественной и зарубежной стали заключается в ее маркировке. В любой стране имеется своя национальная система обозначения данного материала.

Несмотря на разницу в маркировке, согласно национальным стандартам, качественный состав сталей производителей из разных стран аналогичен. Но ввиду национальных особенностей есть некоторые отличия аналогов друг от друга. Разница проявляется еще и в температурных режимах при производстве стали различных типов. Во многих случаях западные производители подвергают заготовки менее длительной горячей обработке давлением, по сравнению с отечественными. Огромных различий, которые обуславливают ограничения по использованию, при этом не наблюдается. Но они есть, и влияют на разницу в свойствах импортных и российских сталей [7].

Преимуществом российской стали можно назвать высокое качество при конкурентоспособной цене.

1.5 Термическая обработка пружин

Для изготовления пружин, упрочняемых закалкой с последующим отпуском, используют холоднодеформированную отожженную проволоку или ленту, горячекатаный или холоднокатаный сортовой прокат или катанку. В исходном состоянии указанные полуфабрикаты не характеризуются

высокой прочностью, но имеют повышенную пластичность, позволяющую изготавливать пружины сложной конфигурации. Крупные пружины изготавливают с использованием горячей деформации [9].

Технологический процесс изготовления пружин горячей деформацией в общем случае включает следующие операции: отрезку заготовок, оттяжку или вальцовку концов заготовок в горячем состоянии (950-1150 °С), навивку или штамповку в горячем состоянии (800-1000 °С), обрубку концов, заточку и шлифование торцов пружин (при необходимости), термическую обработку, гидropескоструйную обработку (иногда наклеп дробью), испытание пружин и проверку размеров.

Основным видом термической обработки пружин является закалка с отпуском. Закалка должна обеспечить получение в структуре мартенсита без участков троостита и с минимальным количеством остаточного аустенита. Остаточный аустенит обладает пониженным пределом упругости, а его возможное превращение в мартенсит вызывает понижение релаксационной стойкости и склонность к замедленному разрушению. В связи с этим целесообразно после закалки проводить обработку холодом.

Для снижения склонности к хрупкому разрушению и температуры вязко-хрупкого перехода необходимо стремиться к получению при нагреве под закалку мелкозернистого аустенита и к снижению уровня внутренних напряжений при закалке.

Для предупреждения поверхностного окисления и обезуглероживания нагрев пружин, особенно малой толщины, следует проводить в защитной атмосфере или вакууме [15].

Окончательные свойства определяются условиями отпуска. Режимы отпуска следует выбирать с учетом назначения и условий нагружения упругих элементов в эксплуатации.

Во избежание нежелательных изменений в структуре (коагуляция карбидов и др.) режим отпуска должен быть строго регламентирован по температуре и продолжительности.

Для пружин, работающих в условиях динамического нагружения, для которых возникновение внезапных или замедленных хрупких разрушений особенно опасно, определяющее значение для выбора режима отпуска приобретает также уровень пластичности и сопротивление хрупкому разрушению. В связи с этим температура отпуска повышается выше той, которая соответствует наибольшему пределу упругости.

При выполнении закалки и отпуска пружин необходимо предусматривать меры по уменьшению их деформации. Последующая правка упругих элементов нежелательна, так как вызывает появление остаточных напряжений и ухудшение свойств [15].

Меры по уменьшению деформации разрабатываются применительно к конкретным видам и типоразмерам пружин. Можно использовать такие приемы, как равномерную укладку пружин в печь; приспособления, фиксирующие форму и размеры пружин при нагреве и охлаждении (рисунок 4); отпуск на оправках.

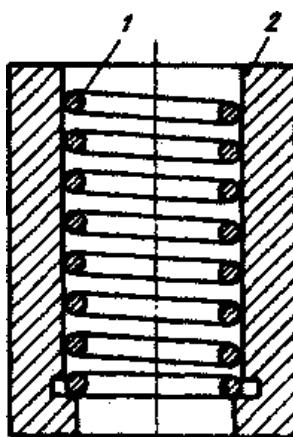


Рисунок 4 – Приспособление для закалки пружин сжатия: 1 – пружина;
2 – оправка

Влияние качества поверхности, обезуглероживания и поверхностной обработки на свойства упругих элементов.

Обезуглероженный слой практически всегда присутствует на поверхности рессор и пружин. Он образуется на всех стадиях технологического передела, производимых с нагревом стали (при прокатке, волочении и др.). В соответствии с ГОСТ 14959-79 допускается глубина

обезуглероженного слоя для всех сталей до 2 % толщины проката (при сечении до 8 мм) и до 1,5 % (при сечении свыше 8 мм); для сталей, легированных кремнием, глубина этого слоя на 0,5 % выше.

Нагрев стали для формообразования упругих элементов и их термической обработки вызывает дальнейшее увеличение глубины слоя и степени обезуглероживания.

Поверхностное обезуглероживание ухудшает прочность при статическом и многоцикловом нагружении и релаксационную стойкость, т. е. основные характеристики, определяющие долговечность упругих элементов в эксплуатации.

Отрицательное влияние обезуглероживания на сопротивление многоциклового усталости связано как с изменением состава и свойств металла в наиболее нагруженных поверхностных слоях, так и с возникновением там остаточных растягивающих напряжений, облегчающих распространение усталостной трещины.

Обезуглероженный слой может оказать и положительное действие, несколько повышая сопротивление стали коррозионному разрушению, сопротивление разрушению при ударных нагрузках, малоциклового усталости, особенно при наличии на поверхности острых концентраторов напряжений. Однако в связи с неконтролируемостью процессов обезуглероживания, указанное положительное влияние обезуглероженного слоя не удастся практически использовать [15].

Мерами уменьшения отрицательных последствий поверхностного обезуглероживания являются использование скоростного нагрева, защитных покрытий, контролируемых и науглероживающих атмосфер, зачистка проката, применение поверхностного упрочнения, особенно поверхностного пластического деформирования (наклепа дробью).

Технология холодной навивки пружин с закалкой и отпуском.

Навивка заготовок выполняется из проволоки, которая производителем заранее была подвергнута патентированию. Этот процесс представляет собой

нагрев до температуры, превышающей интервал превращений, что отлично подготавливает материал для последующей холодной пластической деформации.

В сформированных навивкой заготовках обеспечиваются соответствие таких обязательных параметров, как:

- Диаметр (этот параметр может быть внутренним, средним или наружным).
- Количество предусмотренных витков (рабочих и общих).
- Шаг и размер по высоте изготавливаемой детали (учитываются изменения, возможные в результате последующей обработки).
- Правильность выполнения поджатия крайних витков.

Следующий этап – механическая отделка (торцевание), в процессе которой концевые витки (нерабочие) обрабатываются до образования поверхности, перпендикулярной оси. После этого производится термическая обработка.

Первым этапом термической обработки выполняется закалка: нагрев до температуры выше A_{C3} (в зависимости от используемого материала), выдержка детали в течение указанного времени и принудительное (быстрое) охлаждение специальной среде, в основном в масле (иногда в воде, солевом растворе, других). Важно: для нагрева пружин под закалку их располагают горизонтально во избежание просадки под собственным весом [17].

Завершается термообработка средним отпуском – нагревом до температуры 350...500 °С, выдержкой при этой температуре и последующим охлаждением как правило на воздухе.

После этого производится контроль таких параметров, как твердость, правильность сжатия/восстановления. Если предусмотрено технологией изготовления конкретной детали – применяется очистка пескоструем, упрочнение дробью, нанесение предотвращающего коррозию защитного покрытия.

Технология горячей навивки пружин с закалкой и отпуском

Горячая навивка подразумевает предварительный прогрев материала в электрической или газовой печи (возможный вариант – применение токов высокой частоты).

Подготовленная таким образом заготовка подвергается навивке согласно требованиям технического задания, разводке, а также торцовке и доводке геометрических значений с помощью инструментов. После этого деталь подается на закалку, параметры которой определяются используемым материалом, а потом – на отпуск.

По окончании термообработки производится контроль параметров и, если это необходимо, обжатие, заневоливание, другие дополнительные операции и обработка поверхности. Завершается процесс производства окрашиванием и сушкой.

Сущность термической обработки состоит в том, что нагревом стали или сплава до определенной температуры, выдержкой при этой температуре и последующим быстрым или медленным охлаждением вызывает желаемое изменение свойств стали. Изменение свойств происходит в результате протекающих в стали превращений, изменяющих микроструктуру металла. Основными видами термической обработки стали и сплавов являются отжиг, нормализация, закалка, отпуск и старение [12].

Отжигом доэвтектоидных сталей называется процесс нагрева стали на $30...50^\circ$ выше температуры превращений A_{c3} , выдержки при этой температуре и последующего медленного охлаждения с печью. Отжиг применяют для улучшения структуры стали, улучшения ее обрабатываемости резанием, снятия внутренних напряжений, а также для подготовки к последующей термообработке. Отжиг снижает твердость и повышает вязкость стали.

Нормализацией доэвтектоидных сталей называется процесс нагрева стали на $30...50^\circ$ выше температуры превращений A_{c3} , выдержки при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе. Нормализацией достигается улучшение структуры стали, уменьшение внутренних

напряжений и повышение механических свойств.

Закалкой доэвтектоидных сталей называется процесс нагрева стали на $30...50^\circ$ выше температуры превращений A_{c3} , выдержки при этой температуре и последующего быстрого охлаждения в воде, масле или другой среде. Закаленные стали в большинстве случаев требуют дальнейшей термической обработки (отпуска). Основное назначение закалки заключается в получении стали с высокими твердостью, прочностью и износостойкостью. Однако закаленная сталь обладает повышенной хрупкостью и легко разрушается под действием ударных и изгибающих нагрузок. В закаленных деталях всегда имеются большие внутренние напряжения. Для уменьшения внутренних напряжений и повышения вязкости сталь подвергают отпуску.

Отпуском называется процесс нагрева закаленной стали до температуры ниже критической A_{c1} , выдержки при этой температуре и охлаждения. Отпуск повышает вязкость стали при сохранении пределов прочности и упругости и уменьшает внутренние напряжения.

Термическая обработка оказывает большое влияние на свойства металла и качество пружин. Вид и режимы термической обработки назначают в зависимости от марки стали, профиля заготовки, размера пружины, а также от условий службы и характера работы пружин [12].

Закалочными средами для пружинных сталей могут быть масло, вода, воздух и др. Жидкая закалочная среда помещается в специальный бак, который имеет систему охлаждения – для регулирования температуры закалочной среды. При закалке в воде происходит очень резкое охлаждение, что способствует образованию трещин в материале пружин. Такую закалку применяют для пружинных сталей очень редко, а если применяют, то добавляют в воду различные примеси (известь, мыло, мел и др.), для того чтобы уменьшить скорость охлаждения пружинной стали. Температура закалочной среды оказывает большое влияние на структуру и свойства стали после закалки. Например, если температура масла под закалку равна 60°C , то пружина не получает полной закалки, а закалка пружины в масле,

нагретом до температуры 30 °С, дает требуемую твердость. Масло является самой распространенной средой для закали. Его применение обеспечивает изготовление пружин хорошего качества с наименьшим браком по термической обработке.

Все закалочные среды имеют различную теплопроводность, и наиболее нагретые слои среды находятся в верхней части закалочного бака. Для того чтобы температура среды была равномерна по всему объему, через нее при помощи специальной трубки продувают сжатый воздух. Применяют и другие способы охлаждения и перемешивания закалочных сред.

Термообработка пружины из стали 60С2А включает закалку и средний отпуск.

Сталь 60С2А – сталь перлитного класса. Критические точки постоянны: $A_{c1} = 770 \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $A_{c3} = 820 \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

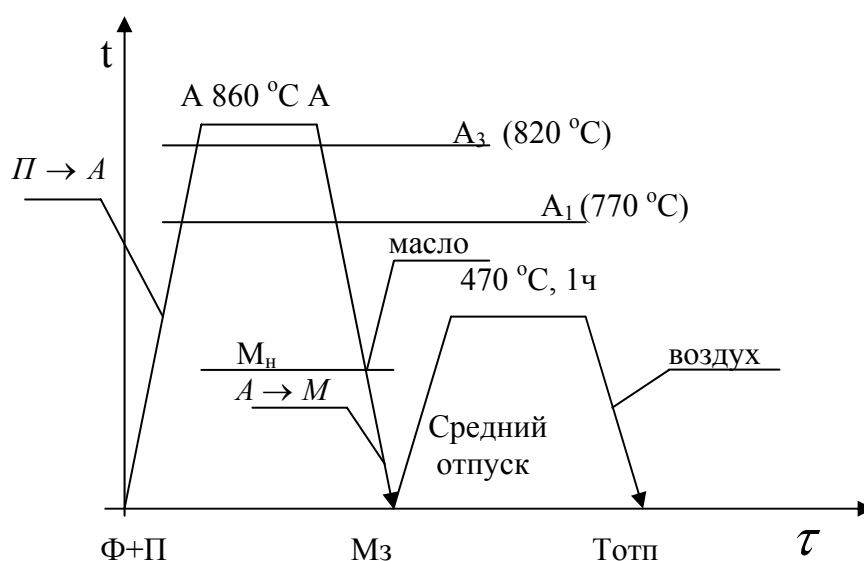


Рисунок 5 – Режим термической обработки стали 60С2А

Режим термической обработки показан на рисунке 5: закалка и средний отпуск. По данным ГОСТ 14059-79 температура закали для стали 60С2А составляет 860 °С ($A_{c3} = 820 \text{ } ^\circ\text{C}$) [1].

В качестве среды, которая охлаждает, выбираем охлаждение в масле со скоростью больше, чем $v_{кр}$ (наименьшая скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит), обеспечивает получение мелкозернистого мартенсита.

Закалку делают таким образом. Партию пружин укладывают и закрепляют на дне сетчатой металлической корзины. Пружины заранее подогревают, потом помещают в печь нагретую до заданной температуры и выдерживают при этой температуре до полного прогревания металла по всему сечению. Длительность выдержки зависит от размера сечения провода и марки стали. После этого делается закалка в закалочной среде. Для предупреждения искривления при нагреве под закалку пружины сжатия перед термической обработкой скрепляют мягким стальным проводом, соединяя торцевые (нерабочие) витки с рабочими витками. Иногда для предупреждения искривлений и искажений формы пружины применяют приспособление (рисунок 6).

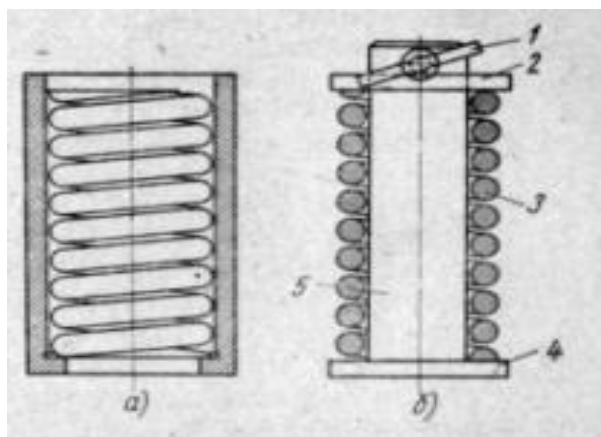


Рисунок 6 – Приспособление для термической обработки пружин

а – с посадкой пружины в стакан

б – с посадкой пружины на оправу

1 – ограничитель

2 – съемная верхняя опорная площадка

3 – пружина

4 – нижняя опорная площадка

5 – оправа

Отпуск средний. Для повышения вязкости и устранения внутреннего напряжения все пружины после закалки подвергают отпуску. При этом наибольший интервал между закалкой и отпуском допускается не больше 4 часа.

Отпуск назначаем при температуре 470 °С (выше интервала температур необратимой отпускной хрупкости). Охлаждают на воздухе в закрытом помещении. Получаемая структура троостита отпуска (мелкодисперсная ферритоцементитная смесь) обеспечивает высокое сопротивление малой пластической деформации при 40 – 50 HRC, при этом указанный режим термической обработки (рисунок 5) обеспечивает приобретение следующих свойств (минимальные значения):

$$\sigma_{0,2} > 1200 \text{ МПа}; \delta > 6\%$$

$$\sigma_B > 1300 \text{ МПа}; \Psi > 25\%$$

НВ 390...480 после отпуска при 470 °С (HRC 40...50)

Термическая обработка пружин уменьшает остаточные деформации за счет уменьшения внутреннего напряжения, увеличивает упругие свойства и вязкость, благодаря чему обеспечиваются высокое качество и надежная работа.

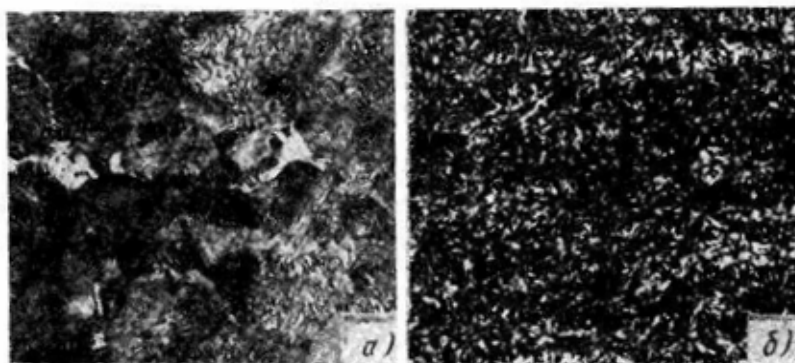


Рисунок 7 – Микроструктура стали 60С2А: а – в отожженном состоянии – феррит+перлит, б – после закалки и отпуска – троостит (x500); травление 4%-ым спиртовым раствором азотной кислоты

Рассмотрим превращения, которые происходят в стали 60С2А при нагреве начальной равновесной структуры Ф+П. На практике при обычных скоростях нагрева (электropечи) под закалку перлит сохраняет свое пластинчатое или зернистое строение до температуры A_1 (750 °С для стали 60С2А). При температуре A_1 в стали происходит превращение перлита в аустенит. Кристаллы (зерна) аустенита зарождаются в основном на границах фаз феррита и цементита. При этом параллельно развиваются два процесса:

полиморфный переход и растворение цементита в аустените [6].

Образование зерен аустенита происходит с большей скоростью, чем растворение цементита и перлита, потому нужна выдержка стали при температуре заковки для полного растворения цементита и получения гомогенного аустенита.

Из рисунка 8 видно, что фазовая перекристаллизация приводит к измельчению зерна в стали.

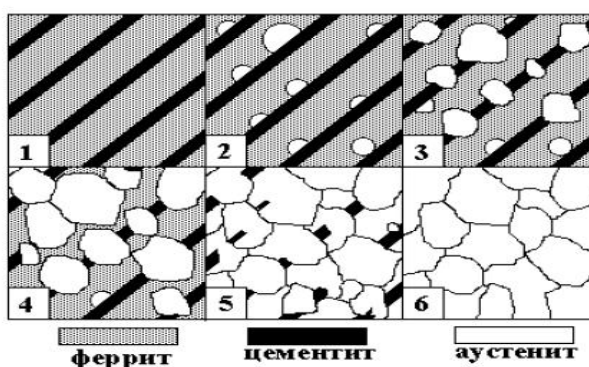


Рисунок 8 – Схема структурных превращений в стали при нагреве

При этом, чем выше дисперсность структуры перлита ($\Phi+\Psi$) и скорость нагрева стали, тем больше возникает центров зарождения аустенита, а следовательно, растет дисперсность продуктов его распада. Увеличение дисперсности продуктов распада аустенита приводит к увеличению пластичности, вязкости, уменьшения чувствительности к концентраторам напряжения.

Изменения структуры стали при закалке в масло. При непрерывном охлаждении в стали аустенит превращается в мартенсит. Мартенситное превращение развивается в сталях с высокой скоростью (1000 – 7000 м/с) в интервале температур M_n и M_k . При этом необходимо учитывать, что с увеличением содержания углерода в стали температуры M_n и M_k снижаются. Введение легирующих элементов также изменяет положение точек M_n и M_k . Например, введение кремния их повышает. В результате заковки стали 60С2А ее структура может иметь кроме мартенсита и некоторое количество остаточного аустенита [9].

Полученный мартенсит является пересыщенным твердым раствором углерода в α -железе и имеет тетрагональную кристаллическую решетку.

Атомы углерода занимают в основном октаэдрические поры.

Образование в результате закалки мартенсита приводит к большим остаточным напряжениям, повышению твердости, прочности, однако при этом растет склонность к хрупкому разрушению, которое требует проведение отпуска.

Превращения в закаленной стали при среднем отпуске (470 °С).

Нагрев закаленной стали до температуры A_1 принято называть отпуском. Отпуск должен обеспечить приобретение необходимых эксплуатационных свойств стали. Структура стали 60С2А после закалки состоит из мартенсита и остаточного аустенита.

Рассмотрим последовательность процессов при отпуске с повышением температуры. До 80 °С диффузионная подвижность мала и распад мартенсита идет медленно.

Первое превращение при отпуске развивается в диапазоне 80...200 °С и приводит к формированию структуры отпущенного мартенсита – смеси пресыщенного углеродом α -раствора и когерентных с ним частиц ϵ -карбида. В результате этого существенно уменьшается степень тетрагональности мартенсита (часть углерода выделяется в виде метастабильные ϵ -карбиды), уменьшается его удельный объем, снижается остаточное напряжение.

Второе превращение при отпуске развивается в интервале температур 200...260 °С (300 °С) и состоит из следующих этапов:

- 1) Превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит;
- 2) Распад отпущенного мартенсита: мера его пресыщенности уменьшается до 0,15...0,2, начинается превращение ϵ -карбида в Fe_3C – цементит и его обособление, разрыв когерентности;
- 3) Снижение остаточного напряжения;
- 4) Некоторое увеличение объема, связанное с переходом $A_{ост} \rightarrow M_{отп}$.

Третье превращение при отпуске развивается в интервале 300...400 °С. При этом заканчивается распад отпущенного мартенсита и процесс карбидообразования. Формируется феррито-карбидная смесь, существенно

снижается остаточное напряжение; повышение температуры отпуска выше 400 °С активизирует процесс коалесценции карбидов, который приводит к уменьшению дисперсности феррито-цементититной смеси.

Структуру стали после низкого отпуска (до 250 °С) называют отпущенным мартенситом, структуру стали после среднего отпуска 350...500 °С – трооститом отпуска; после высокого отпуска 500...600 °С – сорбитом отпуска.

В стали 60С2А после полной закалки в масле и среднего отпуска при 470 °С образуется структура троостит отпуска [9].

Рассчитываем критическую скорость охлаждения по формуле:

$$V_{кр} = \frac{A_1 - t_m}{1,5 \cdot \tau_{min}} \quad (2)$$

где, $A_1 = 770 \text{ °С}$;

t_m – температура минимальной стойкости аустенита; $t_m = 640 \text{ °С}$;

τ_{min} – критическое время; $\tau_{кр} = 6 \text{ с}$.

$$V_{кр} = \frac{A_1 - t_m}{1,5 \cdot \tau_{min}} = \frac{770 - 640}{1,5 \cdot 6} = 14,4 \text{ °С/с}$$

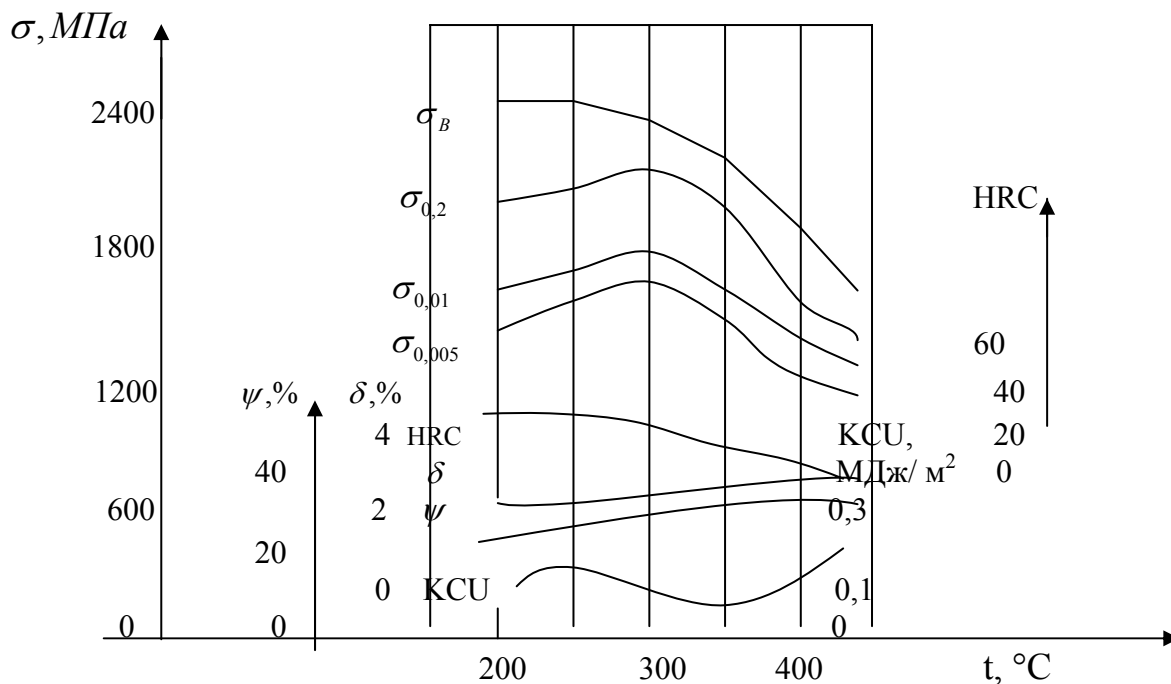


Рисунок 9 – Зависимость механических свойств стали 60С2А от температуры отпуска.

2 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В цикле производственного процесса изготовления пружин термическая обработка является операцией, от которой во многом зависит качество выпускаемой продукции. Поэтому контроль осуществляется в двух направлениях: контроль технологического процесса (по операции и оборудованию) и контроль готовой продукции (после термической обработки).

Контроль технологического процесса производится по следующим параметрам: температурный режим, среда обработки, продолжительность операции и т.д.

При входном контроле проверяют состояние поверхности деталей, микроструктуру, измеряют твердость. В процессе термической обработки контролируют выполнение температурного режима, состав среды печи, продолжительность пребывания пружин в печи, состояние и температуру закалочной среды и моющих средств, скорость применения или подачи закалочной среды. Температурный режим контролируется термистом.

Для обеспечения стабильного состава соли в печах при нагреве под закалку, один раз в смену контролируется химический состав соли, поступающей на участок.

Постоянный контроль температуры масла, поступающего в закалочный бак, осуществляется переносным ртутным термометром [11].

Периодичность контроля зависит от сложности и технического состояния оборудования, но при любых условиях контроль масла проводится не реже одного раза в неделю. Продолжительность операции контролируется с помощью реле времени, аппаратурой для цветовой и световой сигнализации.

Контроль качества винтовых цилиндрических пружин включает следующие операции:

- 1) Наружный осмотр. На поверхности пружин не допускаются

трещины, риски, волосовины и другие грубые дефекты. Для контроля ответственных пружин используют магнитную или люминесцентную дефектоскопию.

2) Испытания под рабочей нагрузкой. Определяется высота пружины при минимальной и максимальной рабочих нагрузках.

3) Динамические испытания. Эти испытания выполняют на копрах под ударами свободно падающей бабы. Качество пружин оценивается наружным осмотром и измерением свободной высоты.

4) Испытания длительной нагрузкой (заневоливание). Они характеризуют релаксационную стойкость пружин. Их применяют для особо ответственных пружин, эксплуатируемых при динамических и циклических нагрузках. Заневоливание выполняют путем выдержки пружин в сжатом состоянии в течение определенного времени при комнатной или повышенной температурах. Длительное заневоливание (в течение не менее 12 ч) применяют для пружин, поломка которых может вызвать аварию механизма. При выдержке под нагрузкой в пружине происходит релаксация напряжений, проявляющаяся в осадке пружин; при последующей эксплуатации осадка пружин увеличивается незначительно. Заневоливание обычно проводят при напряжениях на 10 % выше рабочих напряжений в готовой пружине.

Положительно влияет на качество пружин теплое заневоливание (термофиксация), повышающее предел упругости, релаксационную стойкость и ограниченную выносливость пружин.

В зависимости от типа и условий работы пружин виды и объем испытаний могут различаться. В частности, пружины кручения испытывают с определением угла закручивания и крутящего момента, плоские пружины испытывают на остаточную деформацию при изгибе и т.п [11].

5) Испытание на твердость. Под твердостью понимают сопротивление испытываемого материала вдавливанию в него твердого металлического или алмазного наконечника. На этом основан принцип действия большинства приборов для определения твердости. Испытания на твердость – самый

распространенный способ определения механических свойств материала и имеет широкое распространение. Время, затрачиваемое на этот вид испытания, незначительно, и испытываемая деталь почти не повреждается.

Различают следующие способы определения твердости:

- определение твердости при вдавливании стального шарика (способ Бринелля), единицы измерения HB;
- измерение твердости при вдавливании в металл алмазного или стального наконечника (способ Роквелла), единицы измерения HRB, HRC;
- испытание на твердость при вдавливании в испытываемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° , (способ Виккерса), единицы измерения HV;
- определение твердости методом упругой отдачи (по Шору): при определении твердости методом упругой отдачи изменяется высота отскакивания от испытываемого металла стандартного бойка, свободно падающего с постоянной высоты. Боек изготавливают из закаленной стали или из стали с алмазом на конце и определенный вес.

Для пружин используется метод измерения твердости по Роквеллу – удобный экспрессный метод, так как через четыре секунды (стандартный режим нагружения), либо две секунды (ускоренный) сразу на приборе считывается число твердости.

Единица твердости по Роквеллу связана с разностью глубин внедрения индентора для ситуации (рис. 10) после приложения предварительной нагрузки $P_0 = 10$ кг и ситуации, когда проведено нагружение основной нагрузкой со снятием и оставлением предварительной.

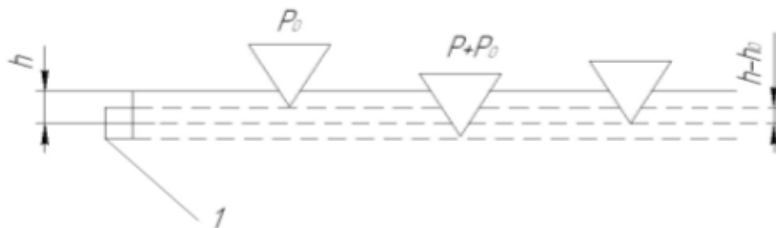


Рисунок 10 – Схема измерения твердости по Роквеллу.

1 – шкала С и А (100 единиц).

$$HRC = 100 - \frac{h - h_0}{0,002} \quad (3)$$

Вся шкала твердости — 100 единиц, одна единица соответствует разности глубин в 2 мкм. Как видно для имеющих погрешность микрометров (половина цены минимального деления), погрешность измерения макротвердости будет выше для очень мягких материалов и для очень твердых. Поэтому по Роквеллу имеются три основные шкалы приведенные в таблице 7.

Таблица 7 – Три основные шкалы по Роквеллу

Индикатор	Шкала	Диапазон твердости	Нагрузка P + Po	Числа твердости
Конус	C	300 – 900	150	19 – 67 HRC
	A	240 – 900	60	70 – 85 HRA
Шарик	B	< 250	100	25 – 100 HRB

Шкалы C и A необходимы для твердых сплавов. Индикатор для них — алмазный конус с углом при вершине 120°, но для сплавов с твердостью до 35 HRC допустим и конус из твердого сплава. Для мягких сплавов — индентор стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Для шкалы B основная шкала не 100, а 130 единиц (красная шкала).

В зависимости от предполагаемой твердости и толщины выбирают либо шкалу C, либо шкалу A; то есть шкала A для сплавов с небольшой толщиной. Так же, как и в других методах измерения макротвердости, расстояние между центрами соседних отпечатков должно быть не менее 2,5 мм, расстояние от центра отпечатка до края не менее 4,5d. Поверхность сплава должна быть сошлифована [11].

Для Роквелла допустимы измерения на цилиндрических поверхностях. Существуют таблицы, где приведены допустимые интервалы твердости и минимальные радиусы кривизны для измерений.

Помимо HRC имеется шкала HRCэ, которая отличается от HRC на 1,5 –

2 единицы (21 - 67 единиц твердости) и связана с тем, что в эталонных конусах отличаются величины по радиусу закругления.

Проведение испытания на твердость:

1) Выбрать подходящую для проверяемого материала шкалу (А, В или С), для нашей пружины (С).

2) Установить соответствующий индентор и нагрузку

3) Перед тем, как начать проверку, надо сделать два неучитываемых отпечатка, чтобы проверить правильность посадки наконечника и стола

4) Установить эталонный блок на столик прибора

5) Приложить предварительную нагрузку в 10 кгс, обнулить шкалу

6) Приложить основную нагрузку и дождаться до приложения максимального усилия

7) Освободить индентор

8) Прочсть на циферблате по соответствующей шкале значение твердости (цифровой прибор показывает на экране значение твердости)

9) Порядок действий при проверке твердости испытуемого образца такой же, как и на эталонном блоке. Делать по два измерения на образце.

Механические испытания деталей или образцов не могут дать полного представления о качестве термической обработки. Для лучшего выявления свойств металла после термической обработки производят металлографическое исследование строения металла методом макро- и микроанализа.

Макроскопический анализ производится путем изучения структуры или излома невооруженным глазом, а также через лупу с небольшим увеличением. Макроанализ позволяет наблюдать структуру металла на большие площади, выявлять направления волокон и металлургические дефекты (трещины, волосовины, газовые пузыри, ликвацию и т. п.). Для макроанализа поверхность детали или образца, подлежащую изучению, шлифуют и травят специальными реактивами. Изломы изучают без специальной подготовки поверхности. Обычно после макроанализа

производится микроанализ.

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры с помощью оптического или электронного микроскопа при больших увеличениях. Если при испытании применяется обычный оптический микроскоп, структуру металла можно изучать и фотографировать при увеличении до 2000 раз. Микроскопический анализ позволяет изучать размеры и расположение зерен, отдельных составляющих структуры металла, определять глубину слоя после химико-термической обработки, характер мелких дефектов, посторонних включений и т. п. Для микроанализа требуется приготовление специальных микрошлифов – образцов, вырезанных из детали. Поверхность образцов, подлежащих изучению, должны быть отполированных до зеркального блеска и протравленных специальными реактивами.

2.1 Анализ возможного вида брака и меры по его предотвращению

При проведении технологической обработки возможно появление следующих видов брака:

1) недогрев – получается в случае, если температура нагрева ниже требуемой или выдержка недостаточна. При недогреве снижаются пластические свойства. Исправить недогретую сталь можно повторной технологической обработкой при нормальной температуре.

2) перегрев – получается при значительном превышении температуры нагрева или измененные длительной выдержке. Перегрев приводит к росту зерна, а при сильном перегреве образуется так называемая видманштеттовая структура, характеризующая пластинчатой формой ферритных участков, расположенных под углом друг к другу с образованием треугольников и низкими свойствами особенно ударной вязкостью. Исправить перегрев можно проведением отжига. При значительном перегреве рекомендуется двукратный отжиг, при котором первый отжиг производится при

температуре на 50... 150 °С выше требуемой.

3) неудовлетворительная твердость – несоответствие нормам твердости является одним из видов брака при технологической обработке. Если твердость металла выше требуемых норм, то необходимо применить повторный отжиг, причем особенное внимание следует обратить на равномерный прогрев металла. Иногда повышенная твердость вызывается перегревом. Если металл после отжига имеет более низкую твердость, чем это предусмотрено техническими условиями то для исправления применяют нормализацию с кратковременным отжигом.

4) пережог металла это такой порок, который совершенно неисправим, а, следовательно, и недопустим. Он наблюдается при таких высоких нагревах сплава, когда последний близок к точке начала плавления. В этом случае по границам зерен сплава начинается оплавление основной фазы и возможных примесей и проникновение к ним кислорода, дающего с металлом и примесями неметаллические (окисные) включения или оболочки, разобщающие связь между зернами и этим сильно снижающие прочность и пластичность металла. При сильном пережоге такие неметаллические пленки вокруг зерен можно видеть на полированном шлифе даже без травления. Такие пленки уже нельзя удалить из металла термической обработкой, и пережженный металл становится непоправимым браком, годным лишь в переплавку.

3 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

Выбор основного оборудования начинается с анализа существующего на заводе оборудования, обсуждения его достоинств и недостатков. Также необходимо рассмотреть какие виды основного оборудования обладают большей производительностью, обеспечивают лучшее качество термообработки, лучше механизированы и автоматизированы [5].

К основному оборудованию относится оборудование, применяемое для выполнения технологических операций, связанных с нагревом и охлаждением деталей: печи, нагревательные устройства и установки, охлаждающие устройства.

Выбор оборудования зависит также от способа выполнения операций, устанавливаемого в зависимости от следующих факторов:

- 1) характера загрузки;
- 2) положения изделий в процессе обработки;
- 3) сочетания операций;
- 4) режим работы оборудования.

Для осуществления выбранных режимов термической обработки применено следующее оборудование:

- ванна электродная соляная;
- бак масляный закалочный
- бак промывочный для удаления масла
- камерная печь для отпуска.

Рассмотрим подробнее каждый вид оборудования.

Ванна электродная соляная

Для закалки пружин выбрана ванна электродная соляная представленная на чертеже 220402.2019.026.01.00 СБ. Состав соли $25\%BaCl_2+75\%NaCl_2$. Электроды установлены в рабочем пространстве ванны

[10].

Широкое применение расплавленных солей при закалке, обусловлено следующими преимуществами нагрева в жидких средах по сравнению с нагревом в печах:

- быстрый прогрев заготовки за счет плотного контакта нагретой среды с металлом;
- жидкая среда обеспечивает одинаковую интенсивность нагрева со всех сторон (равномерный прогрев всей толщи изделия), получение однородной структуры и свойств и уменьшает величину закалочной деформации;
- жидкая среда защищает пружины от окисления и обезуглероживания
- в момент переноса закаленной пружины в охлаждающую среду на ее поверхности сохраняется тонкая пленка застывшей соли, которая защищает пружину от интенсивного окисления в процессе охлаждения.
- небольшие потери тепла и хорошая теплоотдача среды повышают КПД и экономичность печи с использованием солевых расплавов;
- возможность точного соблюдения температурного режима за счет постепенного прогрева жидкой среды;

Быстрый нагрев в печах-ваннах изделий объясняется намного более высоким, чем в обычных печах, коэффициентом теплопередачи. Нагрев в ваннах обеспечивается теплообменом между средой и изделием.

В рабочем пространстве установлены электроды, к которым подводится энергия от печного трансформатора. Контроль и регуляция температуры в ваннах осуществляется термопарой. Нагревательным элементом является расплавленная соль. Протекающий по электродам ток достигает большой величины, поэтому вокруг них возникает сильное магнитное поле. Под действием этого магнитного поля начинается интенсивная циркуляция расплавленной соли в ванне. Около стен ванны соль поднимается со дна, и, достигая верха, перемещается к электродам, а затем вниз, к нижним концам электродов. Возникающая циркуляция соли способствует выравниванию температуры в ванне и предотвращает перегрев

соли вблизи электродов [10].

Ванна представляет собой металлический каркас, футерованный огнеупорным и теплоизоляционными материалами.

Электродные ванны более экономичны, чем ванны с внешним обогревом, т.к. в них теплота выделяется непосредственно в теплоносителе (соли) и таким образом уменьшаются ее потери в окружающую среду.

Электроды устанавливаются из жаропрочной стали, в нашем случае из стали 12Х18Н10Т. Соляные ванны оборудуются мощной вытяжной вентиляцией для удаления паров соли и горючих выделений от детали [20].

Технологические данные и характеристика печи приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Технологические данные и характеристика печи

	Наименование параметра	Норма
Ванна электродная соляная		
1.	Рабочая температура, °С	до 900
2.	Мощность, кВт	60
3.	Состав соли	25%BaCl ₂ +75%NaCl ₂
4.	Вес садки, кг	до 30

Бак масляный закалочный

Бак масляный закалочный представлен на чертеже 220402.2019.026.02.00 СБ.

Каркас бака закалочного представляет собой герметично сваренную из листовой и профильной стали емкость, внутри которой установлены узел подогрева и циркуляции масла. Конструкция покрашена грунтовочной и покрывной краской.

Узел подогрева снабжен трубчатыми электронагревателями (ТЭН) и обеспечивает нагрев масла до требуемой температуры. Система подогрева обеспечивает постоянство температуры закалочного масла независимо от такта работы и температуры окружающей среды.

Система охлаждения включается автоматически при достижении температуры, выставленной на терморегуляторе. Охлаждение масла

осуществляется в теплообменнике проточной водой [8].

В системах циркуляции и охлаждения масла предусмотрена запорная арматура, необходимая для обеспечения гибкого регулирования процессов при различных массах обрабатываемых изделий.

Бак оборудован краном для аварийного слива масла. Технические характеристики масляного закалочного бака приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики масляного закалочного бака

Наименование параметра	Норма
Размер рабочей камеры, мм длина-ширина-высота	1200-1000-2000
Масса садки, кг	50
Температура поддержания масла, °С	40-60
Установленная мощность, кВт	11
Среда в рабочем пространстве	масло
Температурный датчик	Термосопротивление
Регулирование температуры	автоматическое
Параметры питающей сети напряжение, В	380
частота, Гц	50
количество фаз	3

Охлаждение при закалке проводим в закалочном баке с маслом И-20А.

Таблица 10 – Марки промышленных масел.

Показатель	И-20А
Кинематическая вязкость при 50 °С мм г/с	17-23
Индекс вязкости не меньше	85
Температура вспышки в открытом тигле, не ниже застывания не выше, °С	180 - 15
Зольность, % не более	0,005
Содержание (массовая доля) воды, механических примесей водорастворимых кислот и щелочей, серы, %	Отсутствует

Бак промывочный для удаления масла

Детали, прошедшие термическую обработку, промывают в горячем водном растворе щёлочи с целью очистки их от масла. Для этого в термических цехах устанавливают промывочные баки.

Промывочный бак без циркуляции раствора по конструкции аналогичен закалочному баку. К промывочному баку подводится вода, для бака установлен узел подогрева. Узел подогрева снабжен трубчатыми электронагревателями (ТЭН) и обеспечивает нагрев воды до требуемой температуры. В нижней части бака устанавливается кран для слива рабочего раствора при чистке бака. Для интенсификации процесса промывки внутрь бака подают сжатый воздух, который вызывает бурление раствора. Температура раствора поддерживается в пределах 80...90 °С; содержание каустической или кальцинированной соды составляет 3...10 %. Промывка изделий проводится в специальных корзинах или на подвесках в течение 5...15 мин. с последующей сушкой на воздухе. Обновление раствора и чистку бака проводят через каждые 5...10 дней в зависимости от его загрузки [5].

Камерная печь для отпуска

Для отпуска выбираем камерную электропечь СНО8.16.5/10 состоящую из следующих основных сборочных единиц:

- каркас сварной из листовой и профильной сталей. Сводовые листы каркаса – съемные. На задней стенке имеются арматура для вывода нагревателей. На своде электропечи имеется арматура для двух термообразователей рабочей и контрольной.
- футеровка выполнена из огнеупорных и теплоизоляционных материалов. На боковых стенках и на дверце нагреватели (проволочные зигзагоподобные) подвешиваются на штырях, на своде на крючках. Подовые нагреватели укладываются на пазах, между опорными столбиками;
- дверца сварная, зафутерованная огнеупорным и теплоизоляционными

материалами. Подъем и опускание дверцы осуществляется мотор редуктором.

- вся проводка закрыта защитными кожухами.

Рабочая камера выложена из шамотного кирпича. У наружных стен над сводом имеется теплоизоляционная засыпка и слой изоляционного кирпича. В качестве нагревательных элементов применяют сплавы марок Х16Н60, Х20Н80 и Х25Ю5 (в виде проволоки и ленты) [5]. Нагревательные элементы уложены по боковым сторонам и на поду печи. Для предохранения подовых нагревателей от повреждений и замыканий они защищены подовой плитой. Термопара помещается в своде печи. Для наблюдения за нагревом деталей имеется смотровое окно. Подъем дверцы производится при помощи механизма от педали.

Технологические данные и характеристика печи СНО 8.16.5/10 приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Технологические данные и характеристика печи СНО 8.16.5/10

№ п/п	Наименование параметра	Норма
1	Мощность, <i>кВт</i>	86
2	Напряжение, <i>В</i>	380/220
3	Число фаз	3
4	Максимальная рабочая температура, <i>°С</i>	900°С
5	Число электрических зон	1
6	Производительность печи, <i>кг/час</i>	250
7	Среда в рабочем пространстве	Воздух
8	Размеры рабочего пространства, <i>мм</i>	
	ширина	800
	длина	1600
	высота	500

Общий вид электропечи СНО8.16.5/10 показан на рисунке 11.

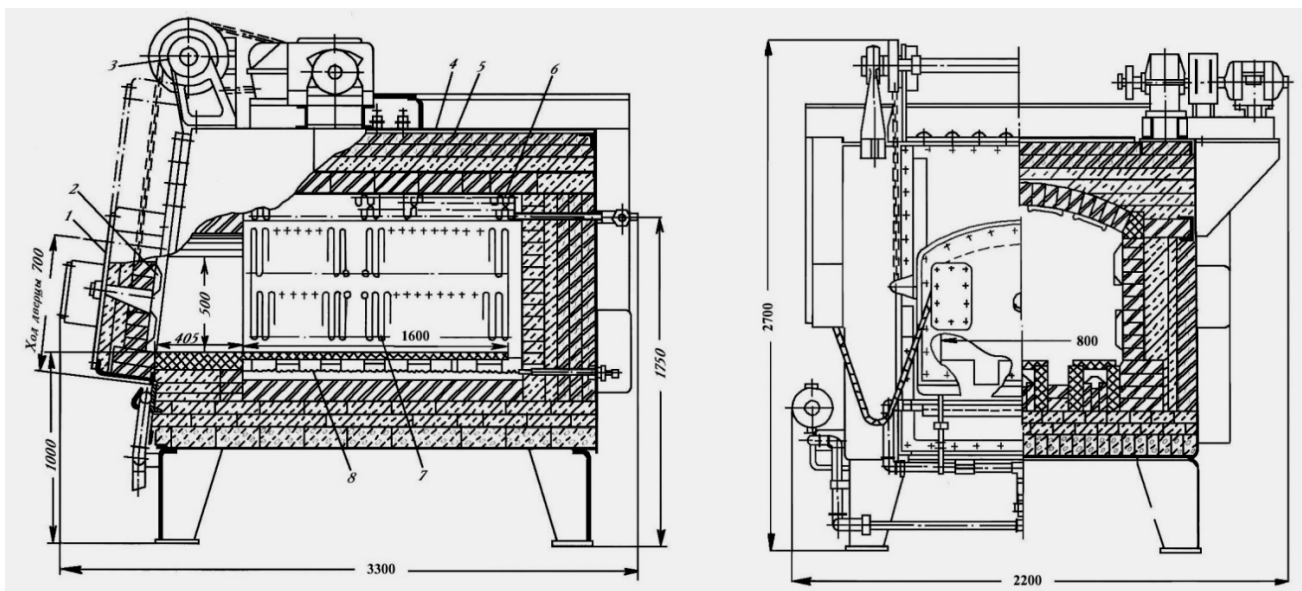


Рисунок 11 – Электropечь сопротивления камерная СНО8.16.5./10
 1-дверца; 2-футеровка дверцы; 3-механизм подъема дверцы; 4-стальной кожух; 5-футеровка печи; 6-сводовые нагреватели; 7-боковые нагреватели; 8-подовые нагреватели.

Подача в электropечь СНО8.16.5/10 электроэнергии, контроль и регулирование температуры осуществляется шкафом. Прибор теплового контроля для измерения и регулирования температуры, ручка переключения на ручной и автоматический режим, стальные лампы расположены на передней панели лампы шкафа [19].

Выбор и описание вспомогательного и дополнительного оборудования

Кроме основного оборудования в термических цехах есть вспомогательное и дополнительное оборудование.

- прибор Роквелла для измерения твердости пружин после отпуска.
- мостовой кран, который перемещается по всему пролету цеха.
- приспособления (поддоны, противни, корзины, ковши, клещи, крюки, захват);
- подставки (для проверки твердости изделий);
- грузовые захваты
- ящики (для межцеховой транспортировки изделий).

- для контроля температуры и времени режима на каждой печи, ванне установлен потенциометр, преобразователь и часы. Сущность потенциометрического метода измерения температуры заключается в том, что электродвижущая сила термопары уравнивается равной ей по величине, по противоположной ей по знаку электродвижущей силой от постоянного источника тока. Такой прибор дает высокую точность при измерении температуры [19].

Таблица 12 – Сводная ведомость оборудования

Оборудование	Модель	Назначение	Характеристика	Кол-во шт	Мощность кВт
Основное оборудование					
Ванна электродная соляная	220402.2019.026.01.00 СБ.	закалка	Рабочая температура <i>860 °C</i>	2	60
Печь камерная электрическая	СНО8.16.5/10	отпуск	Рабочая температура <i>470 °C</i>	2	86
Бак закалочный масляный	220402.2019.026.02.00 СБ	охлаждение	Рабочая температура <i>60 °C</i>	2	-
Промывочный бак	-	очистка от масла	Рабочая температура <i>80 °C</i>	2	-
Дополнительное и вспомогательное оборудование					
Прибор Роквелла	ТК	измерение	нагрузка <i>150кг</i>	2	-
Потенциометр, преобразователь, часы	КСПЗ, ТХА-0806 16р	контроль температуры и времени режимов	-	8	7
Кран мостовой		перевозка	<i>Q=5т</i>	1	7,5

Механизация и автоматизация производства

При проектировании участка термической обработки необходимо предусматривать комплексную механизацию всех основных и вспомогательных операций:

– механизация и автоматизация технологических операций путем применения специального оборудования, оснащенного автоматическим регулированием, и управлением параметров температуры, времени нагрева, и среды обработки;

– механизация и автоматизация вспомогательных, контрольно-приемочных и подъемно-транспортных операций путем, применения механизированных средств перемещения изделий, оборудования и оснастки;

Для регулирования температуры используются потенциометры; для регулирования среды обработки и интенсивности ее циркуляции в рабочем пространстве применяют газоанализаторы прямого и косвенного действия и расходомеры, для продолжительности операции – реле времени [4].

Контроль температуры заключается в том, что сигнал вырабатывается датчиком, который находится в печи, автоматически поступает на измерительный прибор, который фиксирует текущие значения температуры. Автоматическое регулирование температуры используется для поддержания требуемого значения температуры на определенном уровне.

В качестве измерительных приборов используется потенциометры (рисунок 12). Особенностью потенциометров является то, что в них используется компенсационный (нулевой) метод измерения, при котором полностью исключается ошибки измерения, связанные с изменением сопротивления измерительного контура [4].

Принцип действия потенциометра основан на том, что развиваемая термопарой термо-ЭДС, компенсируется равным по величине напряжением от дополнительного источника, который затем измеряется с высокой точностью.

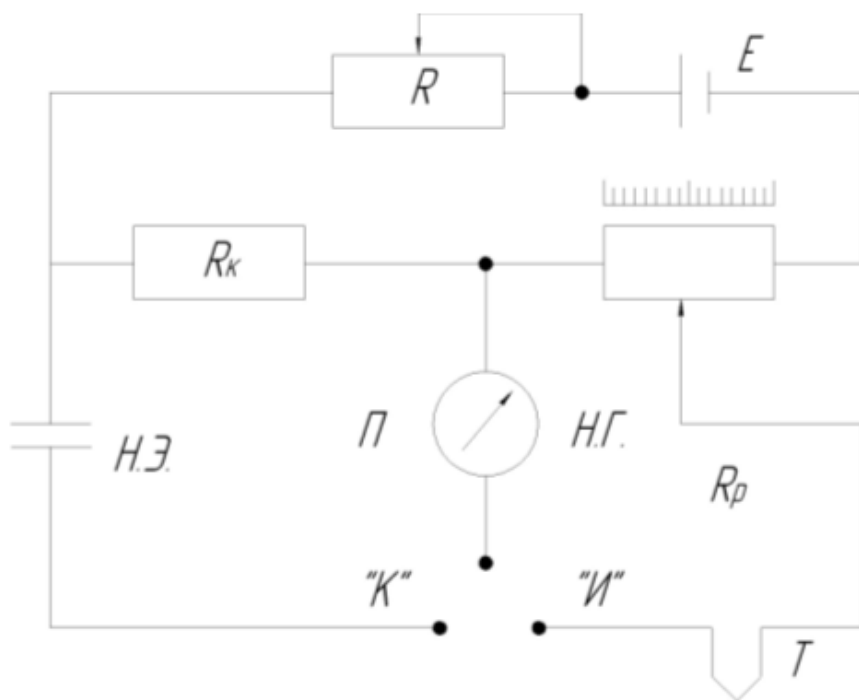


Рисунок 12 – Схема потенциометра.

E – источник напряжения; R – реостат;

R_k – контрольное сопротивление; R_p – реохорд (переменное калиброванное сопротивление);

Н. Э. – нормальный элемент (гальванический элемент, который при 20 С дает строго постоянную Э. Д. С.). $E = 1,0186\text{В}$;

НГ – нуль гальванометр (прибор с нулевой отметкой по середине шкалы);

П – переключатель (в положении "К" или измерение "И").

4 РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ДЕТАЛИ

Размеры пружины приведены в таблице 13 и на рисунке 13.

Таблица 13 – Размеры пружины

D , мм	d , мм	t , мм	H_0 , мм	Число рабочих витков n	Число витков полное n_1	s_k , не менее, мм	Длина развернутой пружины L , мм	Масса, кг, не более
90,00	14,00	24,28	336,6	13	15	3,50	3648,0	4,3994

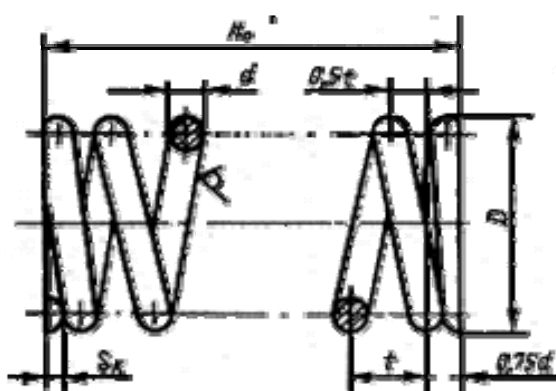


Рисунок 13 – Размеры пружины

Обрабатываемые пружины изготавливаются из прутков, которые с точки зрения теплопередачи являются "тонкими" – коэффициент Bio для них значительно меньше 0,25 [5].

В условиях нагрева в соляных ваннах процесс теплообмена описывается уравнением теплового баланса

$$\alpha \cdot F \cdot (t_{II} - t) \cdot d\tau = G \cdot c \cdot dt, \quad (4)$$

где α – коэффициент отдачи; t – текущая температура изделия; t_{II} – температура печи; $d\tau$ – элементарный промежуток времени; G – масса изделия; c – удельная теплоемкость; dt – элементарное изменение температуры изделия; F – тепловоспринимающая поверхность. Для прутка

$$G = \pi \cdot R^2 \cdot l \cdot \rho \quad (5)$$

где ρ – удельная плотность материала изделия; R – радиус прутка; l – длина прутка, а

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l \quad (6)$$

С помощью этих соотношений выражение (4) можно преобразовать к виду

$$d\tau = \frac{\rho \cdot c(t) \cdot R}{2 \cdot \alpha} \cdot \frac{dt}{(t_{II} - t)} \quad (7)$$

Зависимость ρ стали от температуры в диапазоне (20...900) °С достаточно слабая – в пределах 5%, поэтому можно положить $\rho = 7600 \text{ кг} / \text{м}^3$. Коэффициент теплоотдачи α тоже зависит от температуры, но виду скудости литературных данных об этой зависимости примем значение $\alpha = 850 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Зависимость теплоемкости c от температуры аппроксимируем квадратичным полиномом методом наименьших квадратов. Формулы нахождения коэффициентов полинома приведены в приложении 2.

По экспериментальным точкам находим коэффициенты аппроксимирующего квадратичного полинома.

Таблица 14 – Зависимость теплоемкости

$t, ^\circ\text{C}$	Теплоемкость $c, \text{ Дж} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$
100	481
200	486
400	528
600	565

Таким образом, зависимость теплоемкости стали 60С2А от температуры принимает вид

$$c(t) = 467,025 + 0,1 \cdot t + 1,082 \times 10^{-4} \cdot t^2 \quad (8)$$

Подставляем (12) в выражение (11) и численно интегрируем последнее по интервалу [20...860]:

$$\tau_{нагр.} = \int_{20}^{860} \frac{\rho \cdot R \cdot c(t)}{2 \cdot \alpha \cdot (865 - t)} \cdot dt = 211 \text{ с} \quad (9)$$

Суммируя полученное время нагрева $\tau_{нагр.}$ с $\tau_{выд.} = 1,5 \text{ мин.}$, получаем общую продолжительность пребывания изделия в соляной ванне

$$\tau = \tau_{нагр.} + \tau_{выд.} = 5 \text{ мин.} \quad (10)$$

5 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Тепловой расчет печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. При проектировании печи тепловой баланс составляют с целью определения мощности электрических печей [5].

Расходные статьи.

1. Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла:

где G – масса изделий, кг; t_H – время нагрева изделий в печи, сек; c_M – средняя теплоемкость металла в интервале температур от t_{MH} до t_{MK} , Дж/(кг*К)

$$Q_M = 2(4,3994/301552((860 - 25) = 13474 \text{ Вт} \quad (12)$$

2. Потери тепла на нагрев приспособлений (тары)

$$Q_T = g_T * c_T (t_K - t_H) = 0,015 * 552 * (860 - 25) = 6914 \text{ Вт} \quad (13)$$

g_T – масса приспособлений, нагреваемая в единицу времени, взята как 30% от массы материала, кг/с;

3. Расчет теплотерь через кладку соляной ванны.

Расчет тепловых потерь через кладку производился с помощью программы, реализованной в пакете инженерных расчетов MathCad [5] (код одного из вариантов расчета приведен в приложении 1). Кладка соляной ванны представляет собой четыре боковых стенки и под. Все эти элементы имеют форму усеченной прямоугольной пирамиды, составленной из параллельных слоев разной толщины и теплофизических свойств.

Исходными данными программы являлись геометрические размеры и теплофизические параметры слоев каждого элемента конструкции.

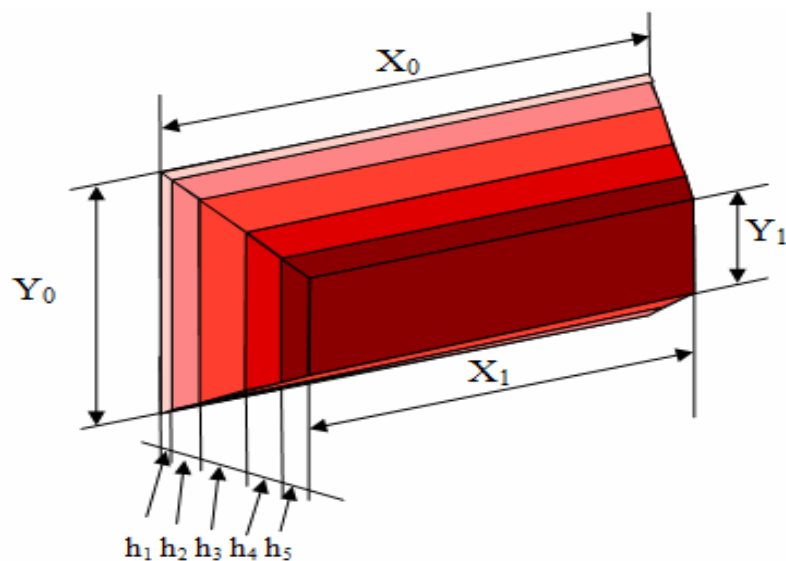


Рисунок 14 – Футеровка стенки

Стенка А

Внешние размеры $X_0=1,196$ (м) $Y_0=0,915$ (м)

Внутренние размеры $X_1=0,38$ (м) $Y_1=0,685$ (м)

Футеровка стенки А состоит из 5 слоев. Параметры слоев приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Параметры слоев стенки А

№ слоя	Толщина, м	a , Вт/м*К	b , Вт/м*К ²
1	0,01	0,18	$4,31 \cdot 10^{-6}$
2	0,036	0,35	$3,35 \cdot 10^{-8}$
3	0,067	0,06	$1,4 \cdot 10^{-4}$
4	0,116	0,76	$2,5 \cdot 10^{-4}$
5	0,116	0,79	$4,2 \cdot 10^{-4}$

Стенка В

Внешние размеры $X_0=1,080$ (м) $Y_0=0,915$ (м)

Внутренние размеры $X_1=0,45$ (м) $Y_1=0,685$ (м)

Футеровка стенки В состоит из 5 слоев. Параметры слоев приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Параметры слоев стенки В

№ слоя	Толщина, м	a , Вт/м*К	b , Вт/м*К ²
1	0,01	0,18	$4,31 \cdot 10^{-6}$
2	0,06	0,35	$3,35 \cdot 10^{-8}$
3	0,116	0,06	$1,4 \cdot 10^{-4}$

4	0,116	0,76	$2,5 \cdot 10^{-4}$
5	0,116	0,79	$4,2 \cdot 10^{-4}$

Под

Внешние размеры $X_0=1,196$ (м) $Y_0=1,018$ (м)

Внутренние размеры $X_1=0,38$ (м) $Y_1=0,45$ (м)

Футеровка пода состоит из 3 слоев. Параметры слоев представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Параметры слоев пода

№ слоя	Толщина, м	a, Вт/м*К	b, Вт/м*К ²
1	0,08	0,18	$4,31 \cdot 10^{-6}$
2	0,115	0,76	$2,5 \cdot 10^{-4}$
3	0,115	0,79	$4,2 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчетов теплотерь через все элементы ванны приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Теплотери через кладку соляной ванны

Элемент	Теплотери, Вт
Стенка А (2 шт.)	2×399
Стенка В (2 шт.)	2×595
Под	2140

Таким образом, общие теплотери через кладку ванны составили 4118 Вт.

4. Тепловые потери излучением зеркала соли ванны

Передача тепла в окружающее пространство путем излучения зеркалом ванны и соответствующие потери тепла могут определены по формуле

$$Q_{изл.} = C \cdot \varphi \cdot F_{изл.} \cdot \left[\left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \text{Вт}, \quad (14)$$

где $C = 4,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент лучеиспускания расплавленной соли; $F_{изл.}$ – площадь поверхности зеркала ванны, м²; $T_{п}$ и T_0 – температуры расплава и окружающей среды, соответственно, φ – коэффициент диафрагмирования;

Расчеты по формуле (14) дают следующий результат

$$Q_{изл.} = 4,6 \times 0,9 \times 0,38 \times 0,45 \times \left[\left(\frac{860 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] = 11610 \text{ Вт}$$

5. Потери тепла, обусловленные «тепловыми короткими замыканиями»

Для термических печей многих типов потери тепла вследствие нарушения сплошности кладки (термопарными трубками, выводами нагревателей, направляющими и осями роликов и т.п.) рекомендуется оценивать величиной, равной 50% от потерь тепла стенками.

На основании расчетных данных по расходу тепла, строится таблица 19 теплового баланса печи.

Приходная статья для электрических печей одна – тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через нагреватели.

Таблица 19 – Тепловой баланс печи

N	Статья прихода	Вт	%	N	Статья расхода	Вт	%
1	Тепло от нагревателей	38175	100	1	1.Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла:	13474	35,3
				2	2.Потери тепла на нагрев приспособлений (тары)	6914	18,1
				3	3.Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи	4118	10,8
				4	4. Тепловые потери излучением зеркала соли ванны	11610	30,4
				5	5 Потери тепла, обусловленные «тепловыми короткими замыканиями»	2059	5,4

	Итого	38175	100		Итого	38175	100
--	-------	-------	-----	--	-------	-------	-----

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в работе изменения технологии термической обработки пружин были реализованы в производственных условиях. Результаты использования предложений по изменению оборудования техпроцесса показали уменьшения брака в четыре раза, и тем самым подтвердили, что использование соляной ванны для нагрева под закалку пружин обеспечивает более высокое качество изделий.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Программа расчета теплопотерь через кладку (стенка А)

Ввод исходных данных

Количество слоев кладки $n := 5$

Внешние размеры кладки $X_0 := 1.196$ $Y_0 := 0.915$

Внутренние размеры кладки $X_1 := 0.38$ $Y_1 := 0.685$

Параметры слоев

толщина	a	b
0.01	0.18	$4.31 \cdot 10^{-6}$
0.036	0.35	$3.35 \cdot 10^{-8}$
0.067	0.06	$1.4 \cdot 10^{-4}$
0.116	0.76	$2.5 \cdot 10^{-4}$
0.116	0.79	$4.2 \cdot 10^{-4}$

Температуры воздуха печи

$t_0 := 20$ $t_b := 860$

Коэффициент теплопередачи $ab := 10$

$h := \text{DatL}^{(0)}$ $a := \text{DatL}^{(1)}$ $b := \text{DatL}^{(2)}$

$$hs := \sum h \quad sL := \frac{a \cdot h + \frac{(t_b + t_0)}{2} \cdot (b \cdot h)}{hs}$$

$$q := sL \cdot \frac{(t_b - t_0)}{hs} \cdot \frac{(X_0 + X_1)}{2} \cdot \frac{(Y_0 + Y_1)}{2} \quad \text{flog}(x) := \ln \left[\frac{hs - x \cdot \left(1 - \frac{Y_1}{Y_0}\right)}{hs - x \cdot \left(1 - \frac{X_1}{X_0}\right)} \right]$$

$$\text{stp}(h1, h2, isl, tr, q) := \left| \begin{array}{l} c \leftarrow a_{isl} \cdot tr + b_{isl} \cdot \frac{tr^2}{2} \\ c \leftarrow c + q \cdot hs \cdot \frac{(\text{flog}(h2) - \text{flog}(h1))}{X_0 \cdot Y_1 - X_1 \cdot Y_0} \\ t \leftarrow \frac{\left[\sqrt{(a_{isl})^2 + 2 \cdot b_{isl} \cdot c} - a_{isl} \right]}{b_{isl}} \\ t \end{array} \right.$$

$$\text{count}(q) := \left| \begin{array}{l} t_0 \leftarrow t_0 + \frac{q}{ab \cdot X_0 \cdot Y_0} \\ h1 \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} h2 \leftarrow h1 + h_i \\ t_{i+1} \leftarrow \text{stp}(h1, h2, i, t_i, q) \\ h1 \leftarrow h2 \end{array} \right. \\ t \end{array} \right.$$

$$\text{CC} := \left| \begin{array}{l} tk \leftarrow \text{count}(q)_n \\ tn \leftarrow \text{count}(q)_0 \\ \text{pause}("tk=\{0\}, tn=\{1\}" , tk, tn) \\ \text{while } |tk - tn| > 5 \\ \quad \left| \begin{array}{l} q \leftarrow q \cdot \frac{tn - tk}{tk - tn} \\ tk \leftarrow \text{count}(q)_n \\ \text{pause}("q=\{0\}, tk=\{1\}" , q, tk) \end{array} \right. \\ t \leftarrow \text{count}(q) \\ \left(\begin{array}{c} t \\ q \end{array} \right) \end{array} \right.$$

$$\text{CC}_0 = \left(\begin{array}{c} 73.928 \\ 104.235 \\ 164.22 \\ 573.153 \\ 692.374 \\ 861.223 \end{array} \right)$$

$$\text{CC}_1 := 595.147$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Фрагмент программы расчета времени нагрева

Расчет времени нагрева детали

Литературные данные по теплоемкости стали 60С2

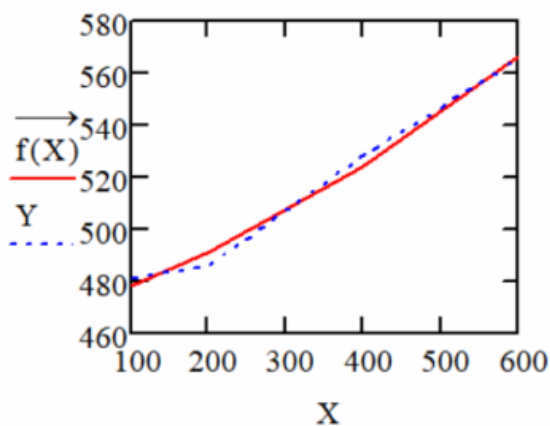
$$X := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \\ 400 \\ 600 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 481 \\ 486 \\ 528 \\ 565 \end{pmatrix} \quad X, ^\circ\text{C} \quad Y, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$$

Расчет элементов матрицы и свободного столбца в методе наименьших квадратов

$$\begin{aligned} A_{0,0} &:= 4 & A_{0,1} &:= \sum X & A_{1,0} &:= A_{0,1} & A_{0,2} &:= X \cdot X \\ A_{1,1} &:= A_{0,2} & A_{2,0} &:= A_{0,2} & A_{2,1} &:= \overrightarrow{(X \cdot X)} \cdot X & A_{1,2} &:= A_{2,1} \\ A_{2,2} &:= \overrightarrow{(X \cdot X)} \cdot \overrightarrow{(X \cdot X)} & B_0 &:= \sum Y & B_1 &:= X \cdot Y & B_2 &:= \overrightarrow{(X \cdot X)} \cdot Y \end{aligned}$$

Элементы матрицы T являются коэффициентами аппроксимирующего экспериментальные данные квадратного полинома

$$T := \text{Isolve}(A, B) = \begin{pmatrix} 467.025 \\ 0.1 \\ 1.082 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad f(x) := T \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{pmatrix}$$



Данные теплопроводности, коэффициента теплоотдачи и геометрических размерах

$$\rho := 7600 \quad \alpha := 850 \quad \underline{R} := 14 \cdot 10^{-3}$$

$$\tau := \int_{20}^{860} \frac{\rho \cdot R \cdot f(x)}{2 \cdot \alpha \cdot (863 - x)} dx = 211 \text{ c}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов, К.Н. Технология термической обработки стали / К.Н. Соколов. – Москва; Свердловск: Изд-во "Машгиз", 1954. – 302 с.
2. Гольдштейн, М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Марочник сталей и сплавов: справочник / под ред. А.С. Зубченко, – 2-е изд., - доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
4. Сатановский, Л.Г. Нагревательные и термические печи в машиностроении / Л.Г. Сатановский, Ю.А. Мирский. – М.: Металлургия, 1971. – 383 с.
5. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчёты термических печей: Учебное пособие / Ю.Д. Корягин. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – 178 с.
6. Ильин, С. И. Технология термической обработки сталей: учебное пособие/ С. И. Ильин, Ю. Д. Корягин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. - 120 с.
7. Попов, А.А. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: справочник / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – М.:Машгиз, 1961 – 430 с.
8. Рустем, С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов / С.Л. Рустем. – М.: Машиностроение, 1971. – 288 с.
9. Термическая обработка в машиностроении: Справочник Т35 ник/ Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783с.
10. Справочник. Соляные ванны для термической обработки изделий / Под ред. Геллера Ю.А. – МАШГИЗ, 1963 – 124 с.
11. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1996. – 437с.

12. Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали: учебное пособие/ М.А. Смирнов, В.М. Счастливцев, Л.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрОРАН, 1999. – 496 с.

13. Металловедение и термическая обработка стали: справочное издание в 3т. / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахшадта, – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Металлургия, 1983. – т. 1. – 386 с.

14. Блантер, М.Е. Фазовые превращения при термической обработке стали / М.Е. Блантер. - М.: Metallurgizdat, 1968. – 268 с.

15. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов: учебник / И.И. Новиков. – М.: Metallurgiya, 1974. – 400 с.

16. Фридман Я.Б., Механические свойства металлов: учебник / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

17. Солнцев Ю.П., Материаловедение: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Пряхин Е.И. – М.: Metallurgiya, 2007. – 784с.

18. Дорофеев, К.П. Основы автоматизации производства и термических цехов и КИП / К.П. Дорофеев. – М.: Энергоиздат, 1987.

19. Долотов, Г.П. Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов / Г.П. Долотов. - М.: Машиностроение, 1988. - 370с.

20. Кауфман В.Г. Электрические печи с жидкими теплоносителями: учебник / Кауфман В.Г. Михайлов Л.А. Пылаев В.М. – М.-Л.: Энергия, 1973. – 104 с.

21. СТО ЮУрГУ 21–2008 Стандарт организации. Система управления качеством образовательных процессов. Курсовая и выпускная квалификационная работа. Требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, А.Е. Шевелев, Е.В. Шевелева. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 55 с.