

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Г.Г. Михайлов

_____ 2019 г.

Технология изготовления коленчатого вала из стали 40ХНМА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 22.03.02.2019.00.000 ПЗ ВКР

Руководитель работы, к.ф.-м.н.

_____ В.Л. Ильичев
_____ 2019 г.

Автор проекта

студент группы П-447

_____ В.С. Головашов
_____ 2019 г.

Нормоконтролер, к.ф.-м.н.

_____ В.Л. Ильичев
_____ 2019 г.

Челябинск 2019

АННОТАЦИЯ

Головашов В.С. Технология изготовления коленчатого вала из стали 40ХНМА. – Челябинск: ЮУрГУ, П – 447; 2019, 69 с. 18 ил., 12 таблиц, библиогр. список – 12 наим.

В дипломной работе описана технология производства коленчатого вала дизельного тракторного двигателя. Описаны условия работы и требования, предъявляемые к изделию. Рассмотрены свойства, процессы выплавки, обработки металла давлением, механическая и термическая обработки коленчатого вала из стали 40ХНМА. Рассчитано время нагрева изделия, произведен расчет теплового баланса шахтной печи и электрических нагревателей.

					<i>22.03.02 2019 070 00 000 П.З</i>		
Изм.	Лист	Недокум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Головашов				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Ильичев					5	69
Реценз.					ЮУрГУ		
Н. Контр.	Ильичев						
Утверд.	Михайлов						

ВВЕДЕНИЕ

В качестве детали для дипломной работы был выбран коленчатый вал – деталь сложной формы, имеющая шейки для крепления шатунов, от которых воспринимает усилия и преобразует их в крутящий момент. Составная часть кривошипно-шатунного механизма. Коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания работают в условиях динамических нагрузок.

В дипломной работе предусматривается выбор марки стали для изготовления тяжело нагруженных коленчатых валов и режим термической обработки, обеспечивающий оптимальное сочетание механических свойств, расчет тепловой печи и электрических нагревателей. Конкретные сведения по данным, необходимым для выполнения дипломной работы, указываются в методической литературе.

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Условия работы изделия

Коленчатый вал испытывает большие нагрузки и подвергается скручиванию, изгибу и механическому изнашиванию. Крутящий момент, развиваемый на коленчатом валу, передается на трансмиссию, а также используется для привода, в действие различных механизмов двигателя. Силы, действующие на коленчатый вал, складываются из сил давления газов и инерционных сил движущихся масс. Особенно большие силы возникают в момент выключения сцепления. Основными неисправностями валов являются износ опорных шеек из-за повреждения вкладышей или деформация – искривление вала из-за перегрева. В результате этого увеличиваются зазоры в подшипниках, в то время как условия смазки ухудшаются, естественный износ шеек наблюдается при больших нагрузках на двигатель. Кроме износа шеек под подшипники, коленчатые валы поступают в ремонт, имея обычно износ резьбы под храповик (в зависимости от конструкции вала), износы отверстий во фланце под болты крепления маховика, под установочные пальцы или направляющие шпильки, отверстия под шарикоподшипник ведущего вала. Все эти нагрузки и силы, действующие, на коленчатый вал приводят к проявлению дефектов и возникновению изнашивания.

1.2 Выбор материала

Коленчатые валы изготавливают из углеродистых, хромомарганцевых, хромоникельмолибденовых, и других сталей, а также из специальных высокопрочных чугунов ВЧ50. Наибольшее применение находят стали марок 45, 45Х, 45Г2, 50Г, а для тяжело нагруженных коленчатых валов дизелей – 40ХНМА, 18ХНВА, 20ХНЗА.

Заготовки стальных коленчатых валов средних размеров в крупносерийном и массовом производстве изготавливают ковкой в закрытых штампах на молотах или прессах при этом процесс получения заготовки проходит несколько операций. После предварительной и окончательнойковки коленчатого вала в штампах производят обрезку облоя на обрезном прессе и горячую правку в штампе под молотом.

Литые заготовки коленчатых валов изготавливают обычно из высокопрочного чугуна, модифицированного магнием. Полученные методом прецизионного литья (в оболочковых формах) валы по сравнению со «штампованными» имеют ряд преимуществ: меньший расход металла, сокращение числа операций при механической обработке, возможность придания оптимальных форм в отношении распределения металла и повышения усталостной прочности, а также литые коленчатые валы из чугуна обладают лучшей способностью гашения крутильных колебаний.

Если сопоставить конструкционные свойства стальных и чугунных коленчатых валов, то можно заметить значительное превосходство стальных валов, перед чугунными, при статических испытаниях, и незначительное – при динамических испытаниях.

Таблица 1. Конструкционные свойства стальных и чугунных коленчатых валов [1]

свойства	сталь	чугун
Предел прочности при растяжении (σ_B), кг/мм ²	60 – 140	35
Конструкционная динамическая прочность валов, кг/мм ²	7,5 – 9	5,5 – 6,5
Относительная статическая прочность, %	4	1
Относительная динамическая прочность, %	1.3	1

Преимуществами легированных конструкционных сталей перед углеродистыми являются более высокая прочность за счет упрочнения феррита и большей прокаливаемости, меньший рост аустенитного зерна при нагреве и повышенная ударная вязкость, возможность применения более мягких охладителей после закалки, устойчивость против отпуска за счет торможения диффузионных процессов. Легированные стали обладают более высоким уровнем механических свойств после термической обработки. Таким требованиям могут соответствовать стали 40ХНМА и 20ХНЗА.

Рассмотрим механические свойства сталей после закалки и высокого отпуска.

Таблица 2. Термическая обработка и механические свойства сталей при различных температурах [1]

Марка стали	Температура, °С		$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	Ψ	КСУ	НВ
	Закалка в масле	Высокий отпуск	МПа	МПа	%	%	Дж/см ²	-
20ХНЗА	820	500	735	930	12	55	108	255
40ХНМА	870	620	835	980	20	62	147	275

Обозначения:

σ_B – предел кратковременной прочности, МПа

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести условный, МПа

δ_5 – относительное удлинение, %

Ψ – относительное сужение, %

КСУ – ударная вязкость, Дж/см²

НВ – твёрдость по Бринеллю

Как видно из таблицы, при высоких температурах, прочностные и пластические свойства выше у стали 40ХНМА.

1.3 Описание выбранной стали

Сталь 40ХНМА – используются для производства высокоответственных, тяжело нагруженных деталей, работающих, при температуре до +500°С. Данная сталь отличается от конструкционных улучшаемых хромоникелевых сталей отсутствием обратимой отпускной хрупкости за счет дополнительного легирования молибденом. Примечание: сталь конструкционная, высококачественная, улучшаемая, хромоникельмолибденовая [1].

Таблица 3. Химический состав стали 40ХНМА (по ГОСТ 4543 – 2016) [1]

Содержание элементов, %								
C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Si	P	S
0,37-0,44	0,6-0,9	≤0,30	0,5-0,8	0,15-0,25	1,25-1,65	0,17-0,37	≤0,025	≤0,025

Таблица 4. Температура критических точек стали 40ХНМА [2]

Ac ₁	Ac ₃	Ar ₃	Ar ₁	Mn
730	820	550	380	320

На рисунке 1 приведена диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 40ХНМА [2].

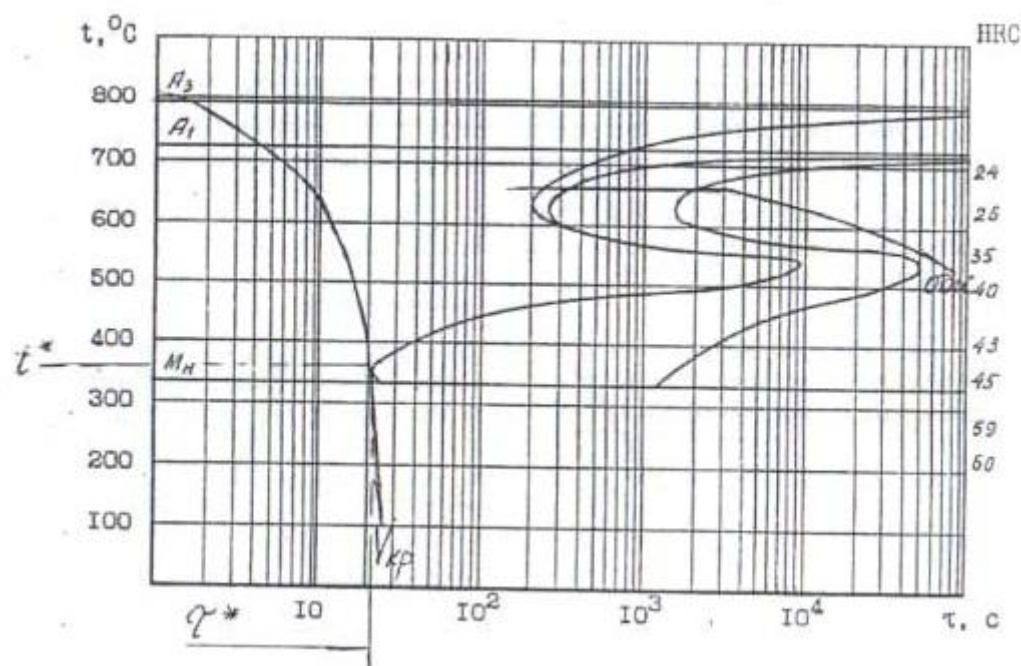


Рисунок 1 – Диаграмма изотермического распада аустенита стали 40ХНМА

Из диаграммы, минимальная устойчивость у переохлаждённого аустенита, наблюдается, при температуре 360°C и инкубационный период составляет 21 секунду.

Определим верхнюю критическую скорость закалки:

$$V_{ВКЗ} = \frac{A_1 - t_{min}}{1,5\tau} = \frac{730 - 360}{1,5 \times 21} = 11,74 \text{ } ^\circ\text{C/сек}$$

Согласно рассчитанной скорости критической закалки оптимальным вариантом закалочной среды для стали 40ХНМА является минеральное машинное масло.

Таблица 5. Предел выносливости для марки стали 40ХНМА [1]

Термическая обработка, состояние стали	σ_{-1} , МПа	J_{-1} , МПа	n	σ_B , МПа
Сечение 100 мм. Закалка 850°C, масло. Отпуск 580°C.	447	274	10 ⁶	880
Сечение 400 мм. Закалка 850°C, масло. Отпуск 610°C.	392 - 519	235		790 - 1080

σ_{-1} – предел выносливости при испытании на изгиб с симметричным циклом нагружения, МПа

J_{-1} – предел выносливости при испытание на кручение с симметричным циклом нагружения, МПа

n – количество циклов нагружения

σ_B – предел кратковременной прочности, МПа

При испытаниях на изгиб и кручение, с одинаковым количеством циклов нагружения и увеличением сечения детали, σ_{-1} и σ_B – увеличивается, а J_{-1} – уменьшается.

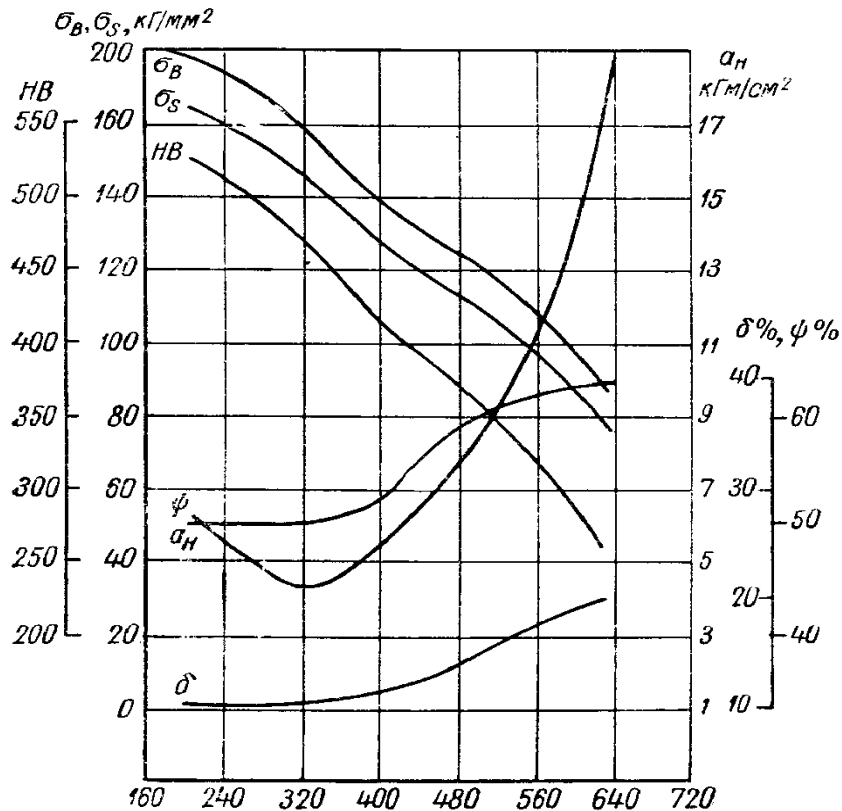


Рисунок 2 – Зависимость механических свойств от температуры отпуска

При анализе рисунка 2 видно, что во время высокого отпуска, при повышении температуры, прочностные свойства стали снижаются, а пластические свойства повышаются. Наиболее резкое повышение пластических свойств происходит при температуре 350°C и выше [1].

Таблица 6. Прокаливаемость материала 40XNMA при термической обработки (закалка 850°C) [1]

Расстояние от торца, мм	9	12	15	21	27	33	42
Твердость для полос прокаливаемости, HRC	50 – 59,5	49 – 59	48 – 59	45 – 56	41 – 53	41 – 50	36 – 48

Количество мартенсита, %	Критический диаметр в воде, мм	Критический диаметр в масле, мм	Критическая твердость, HRC
50	153	114	44 – 47
90	137 – 150	100 – 114	49 – 53

Таблица 7. Физические свойства стали при различных температурах [1]

t, °С	E, ГПа	G, ГПа	λ , Вт/(м·К)	t, °С (интервал)	$\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	c, Дж/(кг·К)
20	215	84	39	20 – 100	11.6	490
100	211	81	38	20 – 200	12.1	506
200	201	77	37	20 – 300	12.7	522
300	190	73	37	20 – 400	13.2	536
400	177	68	35	20 – 500	13.6	565
500	173	66	33	20 – 600	13.9	-

t – температура испытания, °С

E – модуль нормальной упругости, ГПа

G – модуль упругости при сдвиге кручением, ГПа

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

α – коэффициент линейного расширения, К⁻¹

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К)

С ростом температуры модуль нормальной упругости, модуль упругости при сдвиге кручением, коэффициент теплопроводности снижаются, а коэффициент линейного расширения и удельная теплоемкость материала увеличиваются.

1.4 Технологические свойства стали 40ХНМА

Таблица 8. Технологические свойства стали [1]

Температураковки	Начало – 1220°С, конец – 800°С. Сечения до 80 мм – рекомендован отжиг с перекристаллизацией, два переохлаждения, отпуск.
Свариваемость	Трудносвариваемая. Способ сварки: РДС. Необходим подогрев и последующая термообработка.
Обрабатываемость резанием	В горячекатаном состоянии при НВ = 228 – 235 и $\sigma_B = 560$ МПа: $K_{п.тв.спл.} = 0,7$; $K_{п.б.ст.} = 0,4$.
Склонность к отпускной хрупкости	Не склонна.
Флокеночувствительность	Чувствительна.

Конструкционный материал должен быть возможно дешевле, с учетом всех затрат, включающих не только стоимость стали, но и изготовление детали и, наконец, их эксплуатационную стойкость в машинах, в которых они должны работать. Сталь должна удовлетворять требованиям минимальной трудоемкости изготовления детали, и поэтому особое значение приобретает выбор правильного режима предварительной термической обработки заготовок, который назначается с учетом последующих процессов упрочнения. Следует иметь в виду, что применение таких сталей требует определенных мер предосторожности, в связи с их повышенной склонностью к разрушению, при наличии концентраторов напряжений, совместном действии нагрузки и коррозионно – активных сред. Это заставляет предъявлять особые требования к трещиностойкости высоконагруженных деталей.

1.5 Влияние легирующих элементов и примесей на свойства стали

Основные легирующие элементы – это хром (до 1%) и никель (до 2%). Они вводятся для увеличения прокаливаемости, снижения критической скорости охлаждения при закалке, для уменьшения деформации и коробления изделия при закалке, и снижение роли массы изделия при закалке. Благодаря введению хрома и никеля повышается комплекс механических свойств после термической обработки – возрастают прочность (в основном благодаря легированию карбидообразующим хромом), вязкость и хладостойкость стали, благодаря влиянию никеля на феррит.

Помимо основных легирующих элементов в сталь вводят молибден (0,2 – 0,4 %) для снижения склонности к отпускной хрупкости и измельчению зерна (образует с углеродом мелкозернистые трудноразрушаемые карбиды).

Марганец и кремний – полезные примеси, вводятся в небольшом количестве (Mn до 0,8% и Si до 0,4%) при выплавке для раскисления. Еще марганец вместе с никелем понижают критические точки стали. Также марганец предохраняет сталь от красноломкости, который связывает серу в сульфид. Устраняя красноломкость, сульфид MnS, так же, как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды и т.п.), служат концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость сталей.

В стали присутствуют постоянные вредные примеси сера и фосфор и медь, которые попадают в металл из руд.

					<i>22 п.3 п2 2019 п7п пп ппп п.з</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		16

Медь имеет умеренную склонность к сегрегации. К вредному влиянию меди относят снижение хладноломкости стали. При повышенном содержании меди она отрицательно влияет качество поверхности стали при ее горячей обработке. Однако при содержании более 0,20 % медь повышает ее стойкость к атмосферной коррозии, а также прочностные свойства легированных и низколегированных сталей.

Сера – вредная примесь, вызывающая красноломкость стали - хрупкость при горячей обработке давлением. В стали находится в виде сульфидов.

Фосфор – вредная примесь, которая вызывает хладноломкость – снижение вязкости по мере понижения температуры. Также сегрегации фосфора на границах зерен приводят к понижению ударной вязкости. Сильное охрупчивающее действие фосфора выражается в повышении порога хладноломкости, каждая 0,01% P повышает порог хладноломкости на 25°C.

Поэтому содержание вредных примесей является одним из основных параметров, определяющих качество стали. Сталь 40ХНМА является высококачественной сталью – содержание P и S $\leq 0,025$ % [8,9].

					<i>22.03.02.2019 070 00 000 П.З</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		17

2 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ

2.1 Выбор метода и оборудования для выплавки стали

В настоящее время сталь выплавляют в кислородных конвертерах, дуговых электропечах и в мартеновских печах. Соответственно по способу производства сталь подразделяют на конвертерную, электросталь и мартеновскую сталь. Современная технология выплавки стали состоит из двух этапов:

1) На первом этапе в сталеплавильном агрегате готовят жидкий металлический продукт, имеющий определенный состав и температуру. Далее его выпускают в сталеразливочный ковш, где происходит второй этап становления стали – внепечная обработка.

2) На этом этапе в металлический расплав вводят необходимое количество легирующих элементов, раскисляют его, удаляют серу и растворенные газы, точно устанавливают заданные состав и температуру. Готовую расплавленную сталь разливают в слитки или в непрерывнолитые заготовки. На этом операции в сталеплавильном цехе заканчивают [3].

Сегодня, для массовой выплавки стали, применяют дуговые электропечи, питаемые переменным током, индукционные печи и получающие распространение в последние годы дуговые печи постоянного тока, причем доля печей последних двух видов в общем объеме выплавки невелика.

В дуговых печах переменного тока в течение многих десятилетий выплавляли основную часть высококачественных легированных и высоколегированных сталей (сталей электропечного сортамента), которые было затруднительно либо невозможно выплавлять в конвертерах и мартеновских печах. Основные достоинства дуговых электропечей, позволяющие выплавлять такие стали, заключаются [4]:

1) быстро нагреть металл, благодаря чему в печь можно вводить большие количества легирующих добавок;

2) иметь в печи восстановительную атмосферу и безокислительные шлаки (в восстановительный период плавки), что обеспечивает малый угар вводимых в печь легирующих элементов;

3) возможность более полно, чем в других печах, раскислять металл, получая его с более низким содержанием оксидных неметаллических

включений, а также получать сталь с более низким содержанием серы в связи с ее хорошим удалением в безокислительный шлак;

4) плавно и точно регулировать температуру металла.

По типу используемой технологии выплавки дуговые электропечи можно условно разделить на три группы [4]:

1) Высокомощные печи большой вместимости от 80 до 180 т. Они предназначены для выплавки углеродистых и низколегированных марок сталей массового назначения.

2) Печи средней вместимости от 25 до 60 т. Они предназначены для выплавки легированных конструкционных и коррозионностойких марок сталей.

3) Печи малой вместимости от 3 до 25 т. Они используются для выплавки высоколегированных сталей различного назначения.

Сталь 40ХНМА относится к конструкционно-легированным маркам стали, поэтому используются печи среднего объема.

Схема печи представлена на рисунке 3.

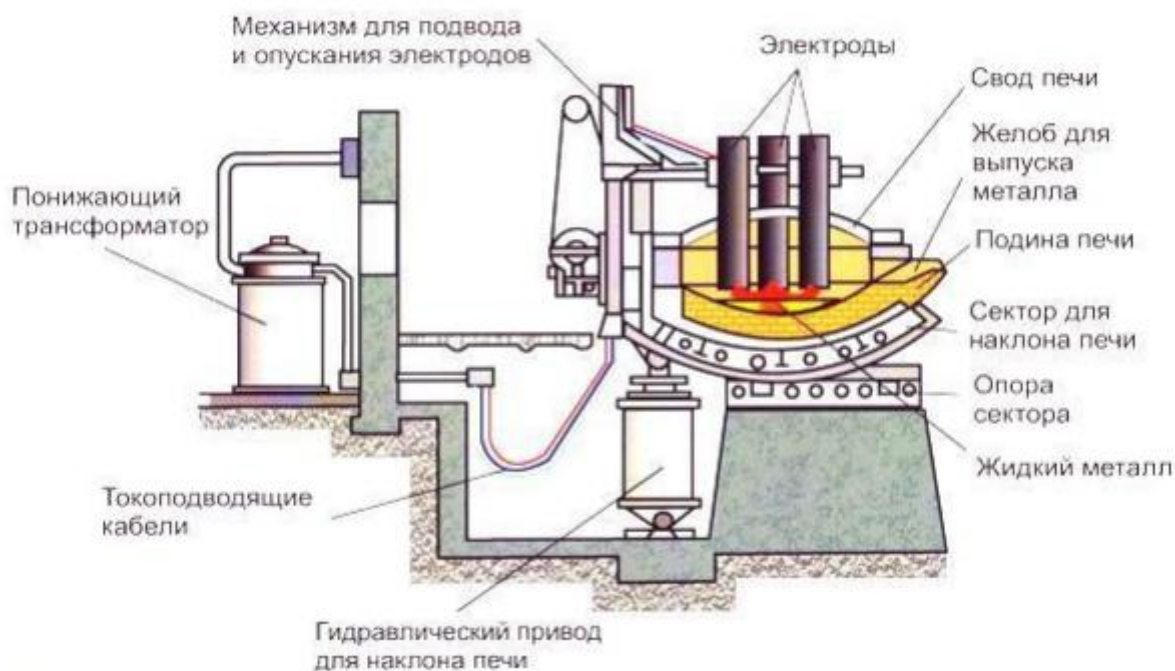


Рисунок 3 – Схема электродуговой печи

Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата
------	------	-----------	---------	------

22 п.3 п2 2019 п7п пп ппп п.3

Лист

19

Плавку ведут в рабочем пространстве, которое выложено из огнеупорного материала. Сверху оно ограничено сводом, снизу подом, с боков стенками. Футеровка печи заключена в металлическом кожухе. Съёмный свод опирается на опорное кольцо. Печь оснащена механизмом подвода и опусканием электродов. После загрузки шихты и пропускании тока по электродам возникает дуга. Под действием дуги из шихты образуется шлак и металл. Путем наклона рабочего пространства через выпускное отверстие сливается металл. По желобу, расположенному на противоположной стороне, выпускается шлак, и в шлаковых ковшах транспортируется на шлаковозы, которые отвозят его на шлаковые отвалы. Для контроля плавки, ремонта пода и загрузки материалов имеется рабочее окно, которое закрывается заслонкой. Загрузку могут производить как через открывающийся свод, так и через рабочее окно с помощью мульд [3,4].

В результате внедрения методов внепечной обработки в современных электродуговых печах осуществляется только расплавление шихты, а все операции по доводке металла производятся в агрегатах внепечной обработки.

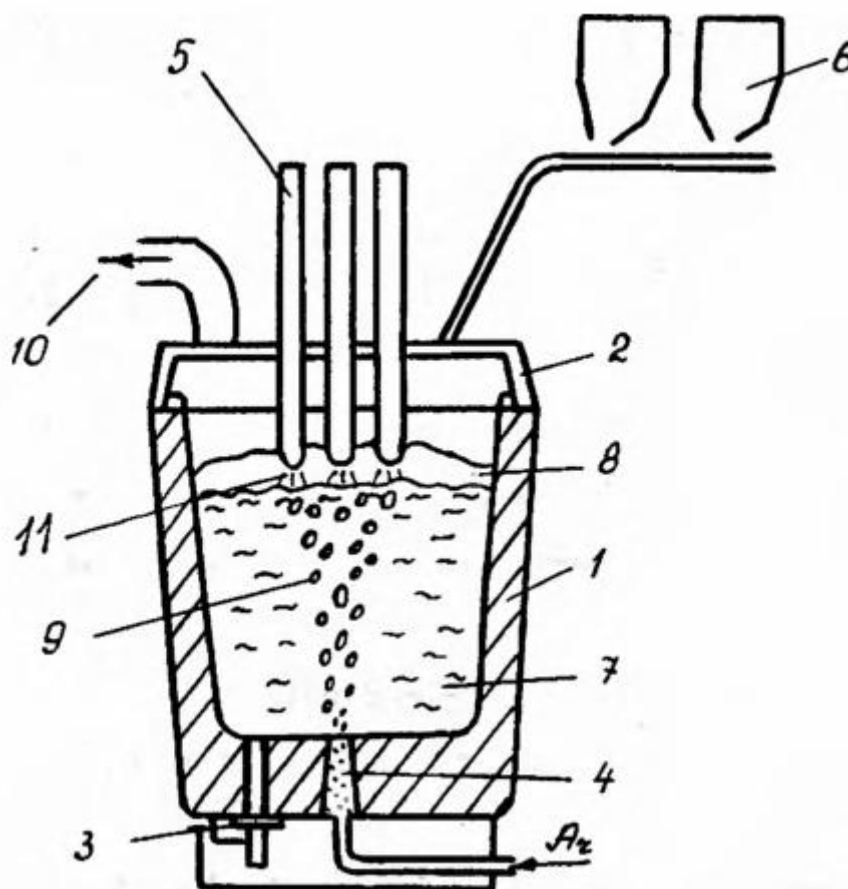


Рисунок 4 – Схема установки ковш – печь [4]:

1 – сталеплавильный ковш; 2 – крышка ковша; 3 – шиберный затвор; 4 – пористая пробка; 5 – электроды; 6 – устройство для присадки ферросплавов; 7 – жидкий металл; 8 – основной восстановительный шлак; 9 – пузыри аргона; 10 – отходящие газы; 11 – электрическая дуга.

Процесс рафинирования осуществляется на установке ковш – печь, с подогревом, и включает в себя продувку металла в ковше аргоном, подаваемым через пористую пробку в днище ковша или через неохлаждаемую фурму, вводимую в металл сверху. Фурма представляет собой стальную неохлаждаемую трубу внутренним диаметром 50 мм, защищенную снаружи шамотными катушками. Также установка оборудована бункерами с дозаторами для введения легирующих и раскислителей и трайб – аппаратами для введения в металл алюминиевой проволоки диаметром 10 мм и полый стальной проволоки диаметром 9 – 16 мм, начиненной ферросплавами с высокоактивными элементами (Ca, Ti, V).

Установки с подогревом решают более широкий круг задач по сравнению с установками без подогрева. Они позволяют отрегулировать температуру металла путем нагрева и вводить большие массы ферросплавов для легирования. Кроме того они позволяют проводить десульфурацию стали. Для этого на зеркале металла (металл из сталеплавильного агрегата необходимо выпустить без шлака или шлак удалить из ковша) наводят высокоосновной, хорошо раскисленный шлак, содержащий 50 – 70 % CaO, 20 – 30 % Al₂O₃, 5 – 10 % SiO₂, 4 – 8 % MgO, менее 0,3 – 0,5 % FeO. Низкой активности FeO в шлаке способствует нейтральная атмосфера в подсводовом пространстве, возникающая благодаря продувке металла аргоном и накоплению его под сводом [3,4].

Разливка — важный этап сталеплавильного производства. Технология и организация разливки в значительной степени определяют качество готового металла и количество отходов при дальнейшем переделе стальных слитков. Непрерывная разливка – это высокотехнологичный и высокоавтоматизированный метод разливки стали.

Наиболее распространена разливка стали УНРС с вытягиванием слитка из кристаллизатора. Суть данного способа разливки заключается в том, что жидкую сталь непрерывно заливают в водоохлаждаемую изложницу без дна – кристаллизатор, из нижней части которого вытягивают затвердевший по периферии слиток с жидкой сердцевиной. Далее слиток движется через зону вторичного охлаждения, где полностью затвердевает, после чего его разрезают на куски определенной длины [3].

В зависимости от направления движения отливаемого слитка различают УНРС вертикального типа, с изгибом слитка и радиальные. На рисунке 5 представлена схема машин непрерывного литья заготовок с различным направлением основной технологической оси.

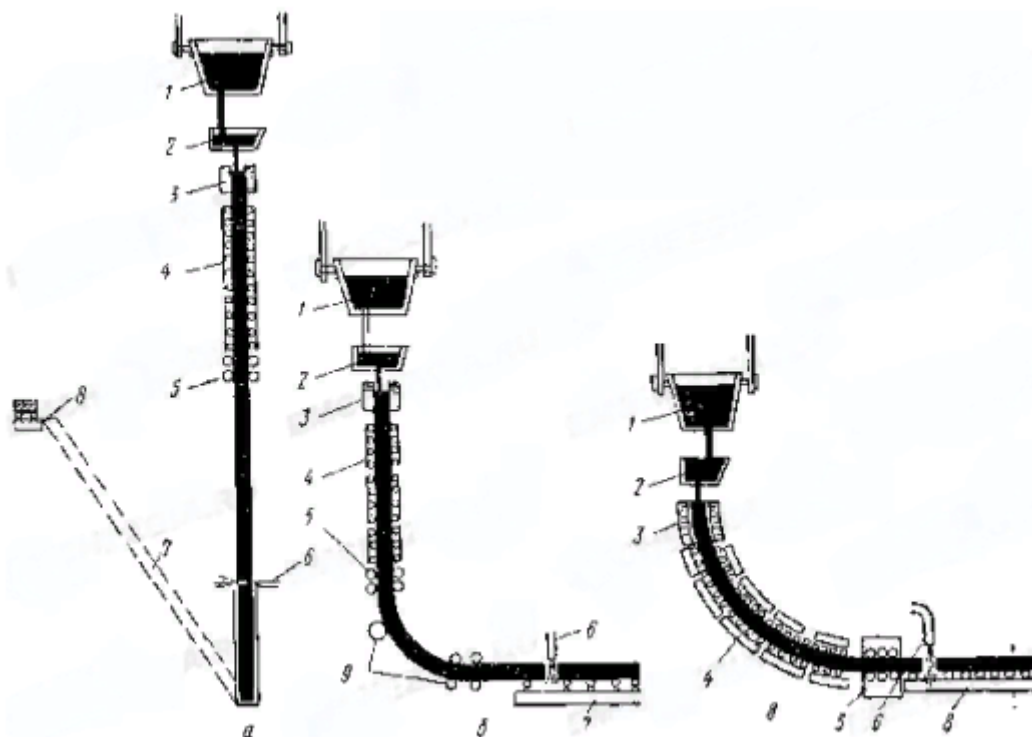


Рисунок 5 – Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)[10]:

а – вертикальная; б – с изгибом слитка; в – радиальная; 1 – сталеразливочный ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – кристаллизатор; 4 – зона вторичного охлаждения; 5 – тянущие валки; 6 – автоматический резак; 7 – подъемник; 8 – рольганг; 9 – изгибающий механизм;

Разливку стали проводят со скоростью 3 м/мин. Разливка расплава в непрерывную заготовку со скоростью менее 2,5 м/мин помимо снижения производительности процесса приведет к повторному насыщению расплава кислородом, азотом и водородом. Это снизит выход годного проката. В зависимости от формы поперечного сечения отливаемого слитка различают слябовые УНРС; сортовые и блюмовые; УНРС для отливки заготовок круглого сечения; полых трубных заготовок; слитков сложного профиля, близких по сечению к готовому прокату [3,4].

Таким образом, оптимальным методом производства стали 40ХНМА является выплавка с использованием такой цепи агрегатов:

1) сталеплавильный агрегат – 2) установка ковш – печь – 3) установка непрерывной разливки стали:

1) Дуговая электропечь средней вместимости, с плавкой на углеродистой («свежей») шихте.

2) Установка ковш – печь, с подогревом.

3) МНЛЗ.

2.2 Процесс выплавки стали

Выплавка состоит из семи периодов: 1) заправка печи; 2) загрузка шихты; 3) плавление; 4) окислительный период; 5) восстановительный период; 6) выпуск стали; 7) внепечная обработка.

1) Заправка заключается в том, что после выпуска плавки на поврежденные участки набивки пода или на всю ее поверхность забрасывают магнезитовый порошок (иногда порошок с добавкой пека или смолы), что позволяет поддерживать постоянной толщину изнашивающегося слоя набивки. Заправку ведут вручную и с помощью различных заправочных машин. Одна из них состоит из бункера, под которым имеется горизонтально расположенный вращающийся диск; машину опускают сверху в открытую печь и высыпавшийся из бункера порошок разбрасывается диском по окружности. Длительность заправки 10 – 20 мин.

2) Загрузка шихты. При выплавке стали в средних печах шихта на 90—100 % состоит из стального лома. Для повышения содержания углерода в шихту вводят чугун (< 10 %), а также электродный бой или кокс. Общее их количество должно быть таким, чтобы содержание углерода в шихте превышало нижний предел его содержания в готовой стали на 0,3 – 0,4 % при выплавке среднеуглеродистых сталей. Этот предел несколько снижается при росте емкости печи. Чтобы совместить удаление части фосфора с плавлением шихты в завалку рекомендуется давать 2 – 3 % извести. Загрузку шихты ведут с помощью корзины (бадьи). Ее вводят в открытую печь сверху и, раскрывая дно, высыпавают шихту на подину печи. Загрузку всей шихты производят одной, а иногда двумя корзинами. Длительность загрузки одной корзины равна ~ 5 мин. В корзины шихту укладывают в следующей последовательности: на дно кладут часть мелочи, чтобы защитить подину от ударов тяжелых кусков лома, затем в центре укладывают крупный лом, а по периферии средний и сверху - оставшийся мелкий лом. Для уменьшения

угара кокс и электродный бой кладут под слой крупного лома.

3) Плавление. После окончания завалки электроды опускают почти до касания с шихтой и включают ток. Под действием высокой температуры дуг шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды постепенно опускаются, проплавляя в шихте "колодцы" и достигая крайнего нижнего положения. В дальнейшем по мере увеличения количества жидкого металла электроды поднимаются, так как автоматические регуляторы поддерживают длину дуги постоянной. Плавление ведут при максимальной мощности трансформатора. На печах вместимостью 25 т и более для ускорения плавления осуществляют вращение ванны. В период плавления необходимо обеспечить раннее образование шлака, предохраняющего металл от насыщения газами и науглероживания электродами.

Во время плавления происходит окисление составляющих шихты, формируется шлак, происходит частичное удаление в шлак фосфора и серы. Окисление идет за счет кислорода воздуха, окалины и ржавчины, внесенных металлической шихтой. За время плавления полностью окисляется кремний, 40—60 % марганца, частично окисляется углерод и железо. Для ускорения плавления иногда применяют газокислородные горелки, вводимые в рабочее пространство через свод или стенки печи. Продолжительность периода плавления определяется в первую очередь мощностью трансформатора и составляет от 1,2 до 3,0 ч.

4) Окислительный период. Задачи окислительного периода плавки: а) уменьшить содержание в металле фосфора; б) уменьшить содержание в металле водорода и азота; в) нагреть металл до температуры, близкой к температуре выпуска (на 120 – 130°C выше температуры ликвидуса); г) окислить углерод до нижнего предела его требуемого содержания в выплавляемой стали. Особо важную роль в этом периоде играет процесс окисления углерода, поскольку с образующимися при этом пузырями СО удаляются растворенные в металле водород и азот, и пузыри вызывают перемешивание ванны, ускоряющее нагрев металла и удаление в шлак фосфора. Окисление примесей ведут, используя либо железную руду (окалину), либо газообразный кислород.

Окислительный период начинается с того, что из печи сливают 65 -75 % шлака, образовавшегося в период плавления. Шлак сливают, не выключая ток, наклонив печь в сторону рабочего окна на 10-12°. Слив шлака

					<i>22 ПЗ ПЗ 2019 П7П ПП ППП ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		24

производят для того, чтобы удалить из печи перешедший в шлак фосфор. Удалив шлак, в печь присаживают шлакообразующие: 1 – 1,5 % извести и при необходимости 0,15 – 0,25 % плавикового шпата, шамотного боя или боксита.

После формирования жидкоподвижного шлака в ванну в течение всего окислительного периода вводят порциями железную руду с известью либо ведут продувку кислородом; печь для слива шлака в течение периода наклонена в сторону рабочего окна. Присадка руды или продувка кислородом вызывает интенсивное окисление углерода с выделением пузырей CO, вспенивающимися шлак, в результате чего он стекает из печи через порог рабочего окна.

Окислительный период заканчивается тогда, когда углерод окислен до нижнего предела его содержания в выплавляемой марке стали, а содержание фосфора снижено до 0,020 %. Период заканчивают сливом окислительного шлака, который производят путем наклона печи в сторону рабочего окна, а также вручную с помощью деревянных гребков, насаженных на длинные железные прутки. Полное скачивание окислительного шлака необходимо, чтобы содержащийся в нем фосфор не перешел обратно в металл во время восстановительного периода. Окислительный период длится от 30 до 90 мин.

5) Восстановительный период. Задачами периода являются: а) раскисление металла; б) удаление серы; в) доведение химического состава стали до заданного; г) корректировка температуры. Задачи решаются параллельно в течение всего восстановительного периода; раскисление металла производят одновременно осаждающим и диффузионным методами. После удаления окислительного шлака в печь присаживают ферромарганец в количестве, необходимом для обеспечения содержания марганца в металле на его нижнем пределе для выплавляемой стали, а также ферросилиций из расчета введения в металл 0,10—0,15 % кремния и алюминий в количестве 0,03—0,1 %. Эти добавки вводят для обеспечения осаждающего раскисления металла. Преимущество диффузионного раскисления заключается в том, что поскольку реакции раскисления идут в шлаке, выплавляемая сталь не загрязняется продуктами раскисления— образующимися оксидами, т.е. будет содержать меньше оксидных неметаллических включений. В конце восстановительного периода, когда шлак и металл раскислены, проводят легирование металла элементами, имеющими значительное химическое сродство к кислороду. Длительность восстановительного периода составляет 40-100 мин.

6) Выпуск стали. На печах средней вместимости выпуск металла осуществляется путем наклона печи через отверстие, расположенное на уровне раздела металл – шлак, или через канал, проложенный в задней стенке и начинающийся у подины (сифонный выпуск). Вытекающий металл по желобу (сливному носку) попадает в сталеразливочный ковш. Сталь выпускается нераскисленной.

7) Внепечная обработка. Ковш с металлом для окончательного регулирования состава и температуры поступает на стенд ковшовой металлургии. После установки ковша с металлом на стенд печь-ковш берут пробу металла и определяют необходимое количество твердой шлаковой смеси для десульфурации металла. Во время всей обработки металла в печи-ковше металл продувают Ar с целью усреднения его состава и температуры. Время обработки составляет 15–20 минут. В наиболее завершеном виде установка для доводки металла включает металлическую или футерованную крышку, фурму для продувки металла аргоном, имеющую привод для вертикального перемещения, 2–3 бункера с затворами и течками, установку для ввода алюминиевой проволоки, устройство для вдувания порошкообразных материалов и приспособления для измерения температуры и взятия пробы. Основным раскислителем при внепечной обработке стали является алюминий, который вводят в виде проволоки диаметром 8–16 мм с помощью трайб - аппарата.

2.3 Разливка стали

1) После окончания разливки предыдущей плавки УНРС готовят к следующей разливке. В эту подготовку входят следующие операции: выведение из машины конца отливавшегося слитка; проверка стенок кристаллизатора и его положения относительно оси УНРС; проверка форсунок вторичного охлаждения и расстояния между роликами и брусками зоны вторичного охлаждения и тянущих устройств, осмотр прочего оборудования; введение затравки в кристаллизатор и заделка зазора между головкой затравки и кристаллизатором (асбестом); покрытие внутренней поверхности стенок кристаллизатора тонким слоем смазки (солидолом, парафиновой, графитовой смазкой).

2) Жидкую сталь из сталеразливочного ковша, через промежуточный ковш заливают сквозной (бездонный) водоохлаждаемый кристаллизатор. Перед разливкой в кристаллизатор вводят стальную затравку, исполняющую

						Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата	<i>22 ПЗ ПЗ 2019 П7П ПП ППП ПЗ</i>	

роль временного днища. Сталь затвердевает у стенок кристаллизатора и на затравке, образуя достаточно прочную корочку, внутри которой еще имеется жидкий металл. Корочку вместе с жидкой сердцевиной начинают непрерывно вытягивать вниз из кристаллизатора, вначале используя затравку, а затем саму заготовку с помощью тянущих валков. Одновременно в кристаллизатор непрерывно продолжают заливать металл со скоростью, соответствующей скорости вытягивания заготовки.

Окончательно металл отвердевает в зоне вторичного охлаждения, благодаря подачи струй воды или воздушной смеси на поверхность заготовки. После прохождения тянущих валков заготовку режут на необходимые для дальнейшей прокатки длины. Для порезки используют кислородные резаки или ножницы. В зависимости от размеров заготовки скорость ее вытягивания изменяется в пределах 0,6 – 6,0 м/мин.

3) При подаче металла в кристаллизатор нельзя допускать перерывов струи и резкого изменения количества подаваемого металла. Перерыв струи ведет к образованию спаев (поясов) на слитке. Изменение расхода металла вызывает колебания уровня металла в кристаллизаторе и появление ужимин на поверхности слитка. Постоянство уровня металла в кристаллизаторе на большинстве УНРС обеспечивают, регулируя подачу металла из промежуточного ковша с помощью стопора, а при использовании промежуточных ковшей со стаканами-дозаторами без стопоров — путем изменения скорости вытягивания слитка из кристаллизатора.

В результате на выходе получают литую заготовку квадратного сечения.

2.4 Анализ возможных дефектов стального слитка

Дефекты стальных слитков разделяют на естественные или неизбежные, которые возникают при затвердевании и охлаждении слитка, и технологические, которые возникают из-за несовершенства технологии разлива, а также выплавки стали. К числу первых относятся усадочная раковина, осевая рыхлость, химическая и структурная неоднородность, сотовые пузыри, эндогенные неметаллические включения; к числу вторых — трещины, плены, завороты корки, подкорковые пузыри в слитках спокойной стали, «голенища» и рослость слитков кипящей стали, малая толщина в них здоровой корочки [4].

Переход металла из жидкого состояния в твердое связан с

формированием кристаллической структуры, при которой упаковка атомов более плотная, что приводит к уменьшению удельного объема металла и неизбежной усадке его от 2,0 до 5,3% [3].

Основные дефекты слитков, получаемых непрерывной разливкой:

1) Осевая пористость, которая заметно усиливается при увеличении перегрева металла и повышенной скорости разливки, иногда переходя в осевые усадочные пустоты.

2) Осевая ликвация, располагающаяся по длине слитка в отдельных участках, из – за того, что примеси скапливаются в пустотах под сросшимися кристаллами осевой части слитка.

3) Всевозможные поверхностные и внутренние трещины, образующиеся в результате совместного воздействия термических напряжений в охлаждаемом слитке и механических усилий от опорных, тянущих и изгибающих роликов.

4) Внутренние пузыри, располагающиеся ближе к поверхности слитка. Отдельные газовые пузыри, обычно обнаруживаемые в верхней части слитка, возникают в результате недостаточной раскисленности стали или повышенного содержания в ней водорода.

3 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ

Под обработкой металлов давлением подразумевают комплекс операций, с помощью которого изменяют форму поперечного сечения заготовок, без нарушения их сплошности, тем самым уменьшают степень последующей механической обработки и снижают отходы производства [5].

В ОМД используют такие процессы, как: прокатка, волочение, прессование, ковка, объемная и листовая штамповка.

Для изготовления заготовки будущего коленчатого вала осуществляются следующие технологические операции:

- 1) Прокатка на прокатном стане.
- 2) Секционная штамповка.
- 3) Предварительная термическая обработка.

3.1 Прокатка заготовки круглого профиля

Прокатным станом называют совокупность оборудования, предназначенного для пластической деформации в приводных вращающихся прокатных валках, транспортировки, отделки, упаковки проката. К основному оборудованию относят деформирующий агрегат с приводом – рабочую клетку (смотри рисунок 6). К вспомогательному оборудованию относят машины для перемещения проката, резания проката на части, для правки, для маркировки. Прокатные станы выполняются одно – или многоклетевыми [5].

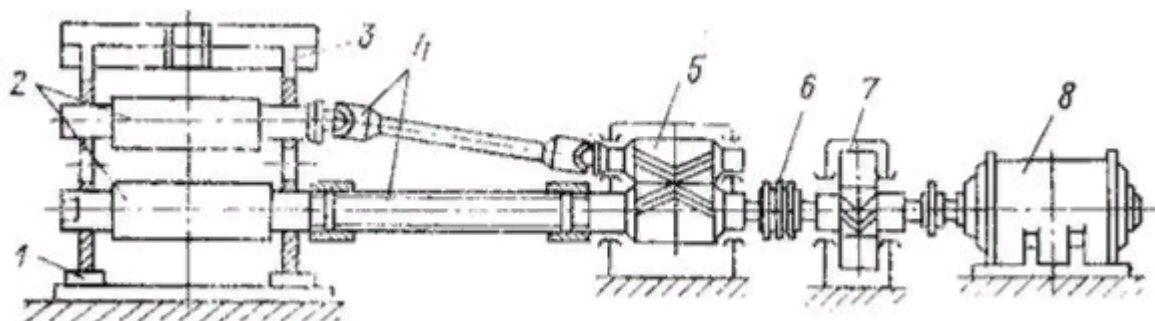


Рисунок 6 – Схема прокатного стана

Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата
------	------	-----------	---------	------

Прокатный стан является основным оборудованием производства проката. Стан состоит из привода и нескольких рабочих клетей. В привод входит электродвигатель 8, редуктор 7, для повышения крутящего момента, муфты 6, шестеренная клеть 5, для распределения крутящего момента на два валка и шпинделей 4, предназначенных для передачи крутящего момента на валки. Рабочая клеть состоит из станины 1 и валков 2. В станине имеются нажимные механизмы (винты) 3, для изменения расстояния между валками и регулирования взаимного расположения их осей.

Для получения нужного профиля прокатку литых заготовок производят последовательно в системе калибров. Наиболее оптимальной системой калибров для прокатки круглого профиля является система квадрат – овал – круг, чтобы способствовать лучшему обжатию и проработке всех слоев прокатываемого металла.

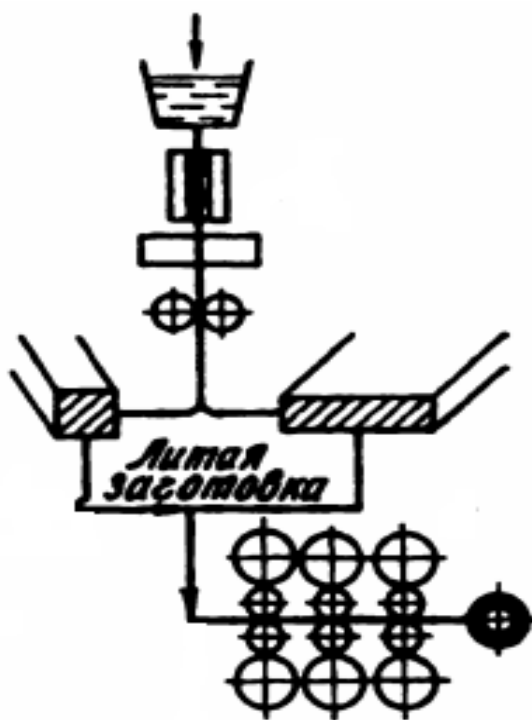


Рисунок 7 – Схема производства сортового проката

Суть данного метода заключается в том, что жидкий металл разливается не в слитки, а в заготовку на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Применение литых заготовок исключает из технологического цикла прокатного производства дорогостоящие и трудоемкие операции получения слитков, нагрев слитков перед прокаткой, и прокатку на блюмингах и слябингах.

3.2 Штамповка в трехсекционном штампе

При объемной штамповке придание металлу определенной формы выполняется в штампах. При смыкании верхнего и нижнего штампов, деформируемый металл, при воздействии подвижных частей штамповочного молота, заполняет ручки, приобретая форму требуемого изделия.

Ковка коленчатых валов сопровождается большими трудозатратами и характеризуется большим расходом металла. Получение крупногабаритных поковок горячей объемной штамповкой требует использования мощных уникальных прессов. Секционная ковка сочетает преимущества ковки и штамповки и позволяет получать крупные поковки при значительно меньших усилиях, чем традиционная горячая штамповка. Качество вала будет выше, из-за того что волокна металла в поковке не перерезаются и сохраняются наружные, высококачественные слои металла. Сущность этого метода штамповки коленчатого вала заключается в том, что штамп делают из трех секций, работающих поочередно (смотри рисунок 8).

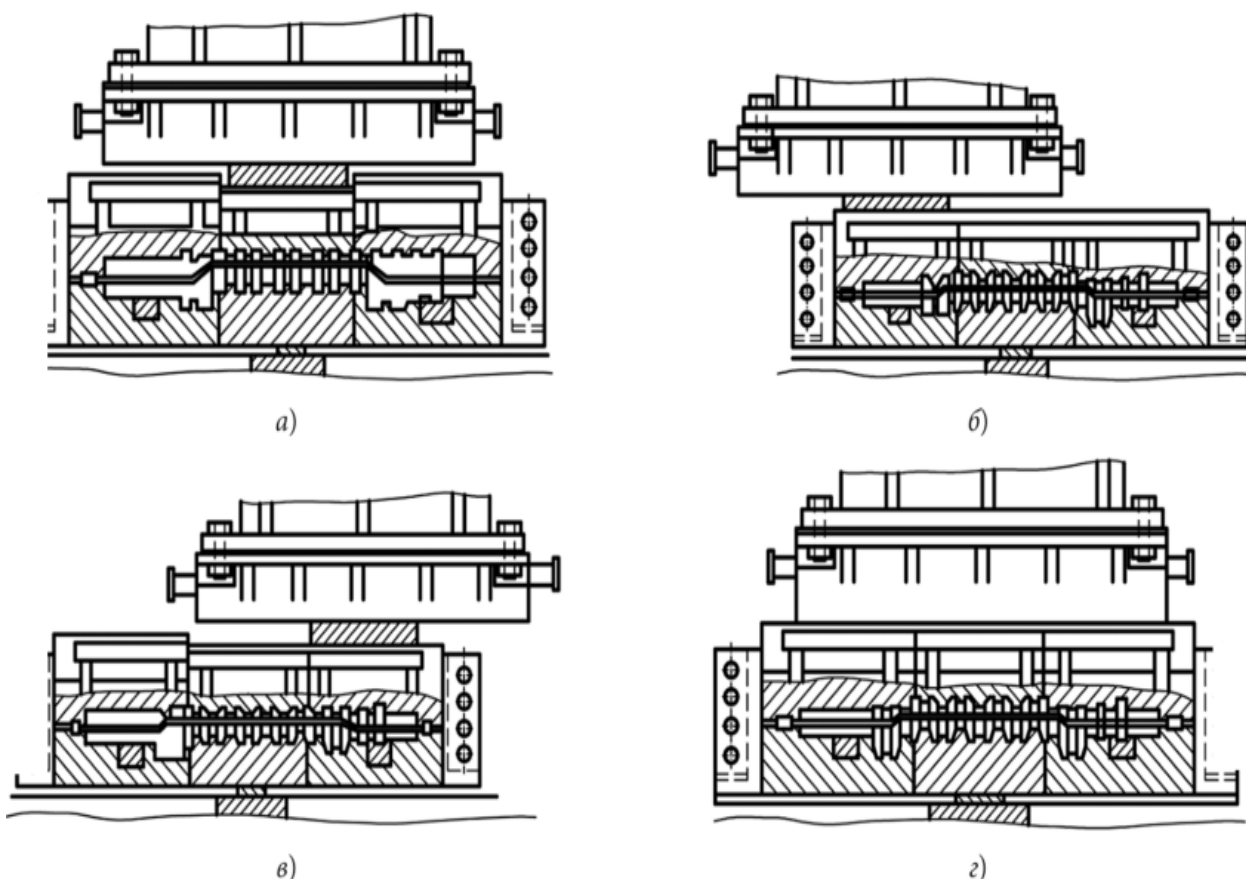


Рисунок 8 – Схема трехсекционного штампа для изготовления поковки коленчатого вала: а) – штамповка средней секцией; б) – штамповка правой секцией; в) – штамповка левой секцией; г) – калибровка вала всеми секциями

Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата

Процесс организован следующим образом. Вначале заготовке дают предварительную деформацию одновременно всеми секциями. Затем, приподняв поперечину прессы, между верхним бойком и средней секцией устанавливают специальную накладку и при полном усилии прессы производят деформирование одной секцией. После этого производят деформирование поочередно крайними секциями, затем накладку убирают, штамп ставят по центру верхнего бойка и производят калибровку вала сразу всеми секциями. Благодаря такому штампу требуемое усилие оборудования снижается приблизительно в 3 раза [3,4,5].

Технологический процесс изготовления поковки коленчатого вала:

- 1) Первый вынос – заготовка круглого профиля, нагрев до 1200°C.
 - а) штамповка в заготовительном штампе.
 - б) обрубка излишков металла.
- 2) Второй вынос – нагрев до 1200°C.
 - а) штамповка вала в трехсекционном штампе.
- 3) Третий вынос – нагрев до 900 – 950°C.
 - а) обрезка облоя в обрезном штампе.
 - б) калибровка.
 - в) маркировка.
 - г) охлаждение.

Очищенные детали подвергаются контролю размеров, полученных по итогу штамповки.

3.3 Предварительная термическая обработка

Предварительная термообработка проводится для улучшения обрабатываемости материала режущим инструментом, повышения его пластичности, снятия внутренних напряжений после штамповки и улучшения структуры. Предварительной термообработке подвергаются заготовки деталей машин. К видам предварительной термической обработки, как правило, относятся: отжиг, нормализация.

Нормализация – термическая операция, при которой сталь нагревают до температуры 30-50°C, выше верхних критических точек (A_3 – для доэвтектоидной стали и A_{cm} – для заэвтектоидной стали), выдерживают при этой температуре и обычно охлаждают на воздухе. Охлаждение на воздухе должно обеспечить формирование феррито – карбидной структуры [5].

Нормализацией устраняют внутренние напряжения и наклеп, повышают механические свойства и готовят структуру стали для окончательной термической обработки. При нормализации превращение аустенита происходит с большей степенью переохлаждения, чем при отжиге, поэтому перлит имеет более тонкую структуру. В результате нормализации сталь получает нормальную, однородную мелкозернистую структуру. В среднеуглеродистых и малолегированных сталях образуется феррито – перлитная структура. При этом прочность и ударная вязкость нормализованной стали значительно выше, чем отожженной. Твердость стали с 0,4 % С, после отжига, равна 160 НВ, а после нормализации 190 НВ. Качество нормализации контролируется по твердости и выборочно по микроструктуре [8].



Рисунок 9 – Режим предварительной термической обработки (нормализация)

Целесообразно использование тепла от ковочного нагрева, но для измельчения зерна от температур штамповки (1200°C), их нужно охлаждать до 600°C, чтобы обеспечить распад аустенита по перлитному механизму. Нагрев заготовки осуществляют в интервал температур 850 – 870°C (немного выше точки A_3). Затем делают выдержку из расчета 1 – 1,5 мин на 1 мм сечения детали и далее происходит охлаждение изделия на воздухе. После ПТО заготовка подвергается очистке от окалина травлением или обработкой на дробеметной машине.

4 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Сложность конструктивной формы коленчатого вала, его недостаточная жесткость, высокие требования к точности обрабатываемых поверхностей вызывают особые требования к выбору методу методов базирования, закрепления и обработки вала, а также последовательности, сочетания операций и выбору оборудования. Основными базами коленчатого вала являются опорные поверхности коренных шеек. Однако далеко не на всех операциях обработки можно использовать их в качестве технологических. Поэтому в некоторых случаях технологическими базами выбирают поверхности центровых отверстий. В связи со сравнительно небольшой жесткостью вала на ряде операций, при обработке его в центрах, в качестве дополнительных технологических баз используют наружные поверхности предварительно обработанных шеек. При обработке шатунных шеек, которые в соответствии с требованиями технических условий должны иметь необходимую угловую координацию, опорной технологической базой являются специально фрезерованные площадки на щеках [6].

Вызываемая силами резания деформация коленчатого вала в процессе обработки вынуждает прибегать после ряда операций к многократной правке его на прессе. Количество правок в зависимости от конструкции вала и вида производства колеблется в довольно широких пределах (от 3 до 9). Правка вызывает внутренние напряжения, которые могут привести к деформации вала при последующей его обработке, поэтому она является мало желательной операцией. В то же время устранение правки вызвало бы увеличение припусков на обработку и, следовательно, повышение трудоемкости механической обработки.

При большой программе выпуска все операции подготовки технологических баз для последующей обработки коленчатого вала можно выполнять на специальных многошпиндельных станках и автоматических линиях [7].

Типовой технологический маршрут обработки штампованных стальных коленчатых валов [6]:

- 1) фрезерование торцов;
- 2) сверление центровых отверстий;

- 3) фрезерование технологических опорных баз на щеках;
- 4) обтачивание концов вала и коренных шеек;
- 5) предварительное шлифование коренных шеек;
- 6) обтачивание противовесов и щек;
- 7) обтачивание шатунных шеек;
- 8) обработка поверхностей камер грязесборников, смазочных каналов и шпоночных пазов;
- 9) термическая обработка – закалка коренных и шатунных шеек;
- 10) окончательное шлифование конца вала, коренных шеек и фланца;
- 11) окончательное шлифование шатунных шеек;
- 12) обработка отверстий во фланце и на концах вала;
- 13) растачивание поверхности посадочного отверстия под подшипник со стороны фланца;
- 14) отделочная операция поверхности коренных и шатунных шеек;
- 15) динамическая балансировка.

4.1 Токарная обработка коренных и шатунных шеек

Коренные шейки, которые в дальнейшем используют в качестве технологических баз для обработки шатунных шеек и других поверхностей, можно обрабатывать на обычных токарных станках, но, так как коленчатый вал является недостаточно жесткой деталью и при обработке имеет тенденцию изгибаться и скручиваться под действием сил резания, особенно при одностороннем приводе токарных станков, то для обработки коренных шеек многоколенных валов применяют специализированные станки, у которых для уменьшения изгибающего и скручивающего моментов предусмотрен центральный или двусторонний привод.

Вал на станках линии базируется коренными шейками и торцовыми поверхностями. В угловом положении вал ориентируется по одной из шатунных шеек. Станки имеют по два приводных шпинделя, между

которыми устанавливается обрабатываемый вал. Шатунная шейка обрабатывается одновременно двумя резцами, установленными в двух суппортах. На одном суппорте установлен резец для подрезки торцов шеек двумя круглыми пластинками и обтачивания средней части шейки одной широкой твердосплавной пластиной. На другом суппорте установлен резец с двумя твердосплавными пластинками для обтачивания крайних частей шейки. На смену резцов затрачивается около 5 мин. Станки позволяют бесступенчато изменять частоту вращения шпинделя и подачу суппортов. Линия сравнительно легко переналаживается на обработку валов других типов.

4.2 Обработка внутренних плоскостей и смазочных каналов

Различные отверстия в шейках, в шейках и фланцах коленчатого вала в зависимости от программы выпуска обрабатывают на вертикальных и радиально – сверлильных станках и на автоматических линиях. В подавляющем большинстве случаев технологическими базами на этих операциях являются цилиндрические и боковые поверхности опорных шеек и для угловой ориентации – базовые площадки шеек, а также наружные поверхности или отверстия соответствующих шатунных шеек. В производствах со значительным масштабом выпуска сверление смазочных отверстий, сверление и нарезание резьбы на шатунных шейках и фрезерование шпоночных пазов в коленчатых валах производят на автоматических линиях, скомпонованных из агрегатных станков. При этом на одних линиях заготовки обрабатывают в приспособлениях – спутниках, на других – в стационарных приспособлениях.

Высокой точности требует обработка отверстия под подшипник первичного вала расположенного со стороны фланца. Кроме того, техническими условиями предъявляются строгое требование перпендикулярности торца поэтому предварительно обработанное отверстие под подшипник подвергают окончательному тонкому растачиванию и для выполнения поставленных технических условий одновременно производят подрезку торца фланца. Для этого применяют специальные инструментальные головки.

4.3 Шлифование и отделка шеек коленчатых валов

При достаточно больших масштабах выпуска коренные шейки шлифуют на многокаменных станках, имеющих автоматический цикл врезного

шлифования с выхаживанием, правкой круга и прибором активного контроля. Многокаменное шлифование предъявляет большие требования к однородности шлифовальных кругов в комплекте. Круги имеют диаметр 1000 – 1100 мм и ширину 25 – 85 мм. Шатунные шейки шлифуют обычно одним кругом поочередно. В качестве технологической базы выбирает поверхность коренных шеек, а для угловой ориентации-отверстия во фланце или, реже, базовой площадке на шейках колен.

Последнее время для шлифования коренных и шатунных шеек коленчатых валов созданы автоматические линии. Автоматическая линия, предназначенная для окончательного шлифования шатунных шеек коленчатого вала, состоит из шести последовательно работающих станков, на каждом из которых в автоматическом цикле обрабатывают определенную шейку. На всех позициях линии все шейки обрабатывают одновременно. В линии установлен один резервный полуавтомат. Станки линии соединены транспортером с гибкой связью и снабжены загрузочными устройствами. Станки имеют пневматические устройства активного контроля, по команде которого по достижении требуемого размера шейки отводятся шлифовальные круги. Автоматический цикл работы каждого станка линии состоит из следующих элементов: установка вала и его закрепление в патроне, ускоренное и рабочее подача шлифовального круга, автоматический контроль размеров, отвод шлифовальных кругов, съем детали и правка кругов.

Если при обработке размеры шлифуемых шеек будут отклоняться на величину больше допустимой, то станок автоматически останавливается, в то время как остальные станки линии могут продолжать работу. Независимая работа станков позволяет производить смену круга и ремонт станка без остановки работы всей линии; в этих случаях в работу вводится резервный станок.

4.4 Балансировка коленчатых валов

При большом выпуске коленчатых валов эту операцию производят на автоматических балансировочных станках или автоматических линиях. Линия состоит из двух балансировочных автоматов и контрольного автомата. Так как один балансировочный станок недостаточно уменьшает неуравновешенность (в 15 – 20 раз), то для еще большего снижения

неуравновешенности на линии применяют двух кратное автоматическое определение неуравновешенности коленчатого вала с последующим ее устранением и контролем. Предварительное устранение неуравновешенности производят радиальным сверлением на определенную глубину отверстия диаметром 20 мм в крайних противовесах вала. Окончательную же балансировку производят сверлением отверстий диаметром 12 мм в средних противовесах. Начальная неуравновешенность коленчатого вала в результате его обкатки на этой линии снижается в 30 – 50 раз и остановится не более 30г/см [6].

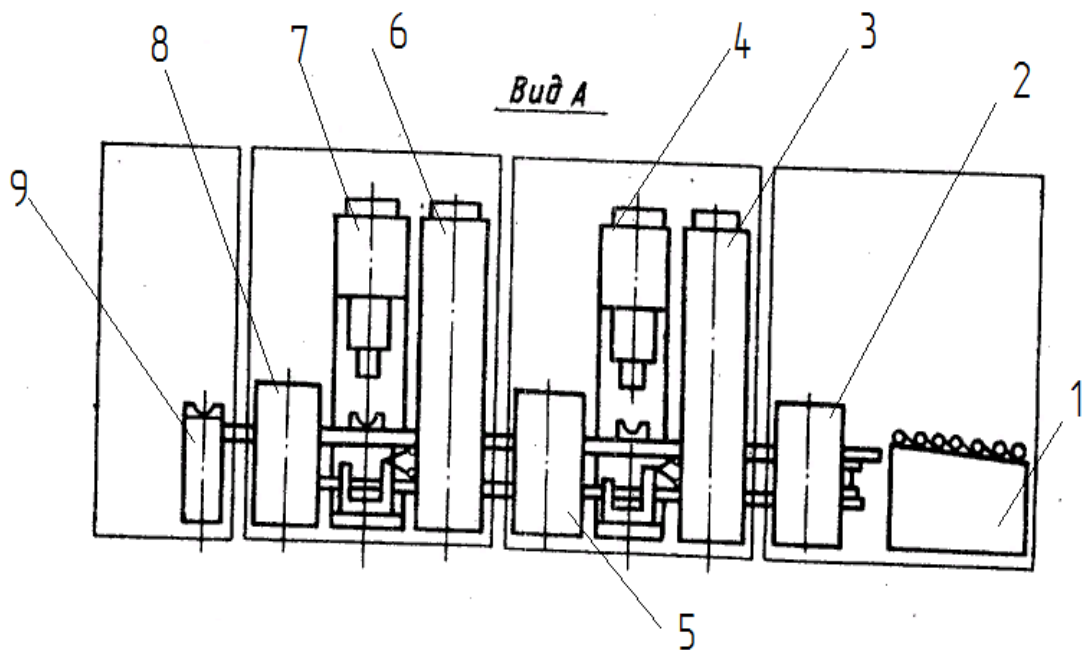


Рисунок 10 – Схема автоматической линии агрегатов для балансировки валов

1 – ячейка накопителя отбалансированных валов; 2 – станок – автомат контрольно – сортировочного участка; 3,4,6,7 – станки – автоматы корректировки масс; 5,8 – станки – автоматы для измерения параметров дисбаланса; 9 – позиция загрузки;

4.5 Контроль допустимых отклонений коленчатого вала

По конструкции валы являются относительно не жесткой деталью, в тоже время испытывают большие переменные нагрузки и подвергаются, под воздействием возникающих в работе сил, кручению и изгибу. Технические условия на коленчатые валы в зависимости от назначения Двигателя определяются ГОСТ. Коленчатый вал контролируют по 80-90 параметрам.

Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата

Кроме размеров и формы, контролируют и относительное положение обрабатываемых поверхностей вала, параллельность оси шеек, положение шатунных шеек по отношению к коренным (радиусы кривошипов), угловое положение шатунных шеек по отношению одна к другой, угловое положение шпоночной канавки по отношению к кривошипам, положение торца Фланца к оси коренных шеек.

К наиболее важным контролируемым параметрам относятся[7]:

1) точность диаметральных размеров коренных и шатунных шеек коленчатых валов в пределах 1 – 2 классов с чистотой поверхности 8 – 10 классов и выше.

2) допустимые отклонения на овальность и конусность лежат в пределах 0,010 – 0,005 мм, а не параллельность осей коренных и шатунных осей коренных и шатунных шеек – не более 0,01 на всей длине каждой шатунной шейки. Допуски на радиусы кривошипов составляют 0,05–0,15 мм.

3) поверхностная твердость коренных и шатунных шеек, полученных после термической обработки, лежит в пределах 53-63 HRC.

Процесс контроля параметров коленчатого вала весьма трудоемкий и сложный. Поэтому для контроля большинства перечисленных параметров применяют специальные многомерные индикаторные, пневматические, пневмоэлектрические и электронные мерительные устройства.

					<i>22 п.3 п2 2019 п7п пп ппп п.3</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		39

5 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

5.1 Выбор термической обработки и его обоснование

Термическая обработка заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующим охлаждении. Основными параметрами являются температура нагрева, скорость нагрева, время выдержки и скорость охлаждения.

Термическая обработка коленчатых валов преследует три цели:

- 1) увеличение прочности;
- 2) повышение износостойкости шеек, работающих в условиях трения и износа;
- 3) увеличение усталостной прочности, т. е. способности выдерживать большое число нагрузок без поломок.

Для тяжело нагруженного вала из стали 40ХНМА применяют следующий режим ТО: закалка + высокий отпуск (улучшение), закалка шеек вала токами высокой частоты (ТВЧ).



Рисунок 11 – Режим термической обработки

Сталь 40ХНМА до термообработки имела структуру феррит – перлит, после термической обработки: заковки с последующим высоким отпуском, сталь приняла структуру сорбита отпуска. При этом сталь стала обладать повышенной твердостью. Выбор данного метода термической обработки обусловлен тем, что высокий отпуск обеспечивает одновременно значительную пластичность конструкционной стали и повышенную прочность изделия.

5.2 Закалка стали 40ХНМА

Конструкционные стали подвергают закалке в целях получения мартенситной структуры. Для заковки стали на мартенсит необходимо нагреть изделие до аустенитного состояния, затем после некоторой выдержки охладить со скоростью, превышающей верхнюю критическую скорость заковки, чтобы подавить распад переохлажденного аустенита, при температурах диффузионного и промежуточного превращений. Важнейшая особенность заковки на мартенсит состоит в упрочнении стали. При проведении заковки возникают высокие внутренние напряжения – в них основная причина коробления изделий и образования трещин[8,9].

Дозвтектоидные стали нагревают до температуры на 30 – 50°С выше точки A_3 . В этом случае сталь с исходной структурой перлит – феррит при нагреве приобретает аустенитную структуру, которая при последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит. Продолжительность нагрева при аустенитизации стали должна обеспечить прогрев изделия по сечению и завершение фазовых превращений, но не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать роста зерна и обезуглероживания поверхностных слоев стали. Охлаждение при заковке должно обеспечить получение структуры мартенсита в пределах заданного сечения изделия и не должно вызывать закалочных дефектов: трещин, деформаций, коробления и высоких растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях. Масло как закалочная среда имеет следующие преимущества: небольшую скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, что уменьшает возникновение закалочных дефектов и постоянство закаливающей способности в широком интервале температур среды (20 – 150°С). На заковку сталь поступает со структурой феррит – перлит. Сталь 40ХНМА является дозвтектоидной сталью, поэтому для её заковки необходимо произвести нагрев выше 820°С (A_3) в интервал до температуры 850–870 °С. Нагрев вал до заданной температуры, его выдерживают около 1 часа, для выравнивания температуры по сечению и

						Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата	<i>22.03.2019 070 00 000 П.З</i>	

далее происходит охлаждение изделия в закалочном баке с маслом ($T_{\text{масло}} = 20 - 25^{\circ}\text{C}$), длительностью в несколько минут.

5.3 Высокий отпуск стали 40ХНМА

Высокотемпературный отпуск проводят при нагреве до 620°C . При этом мартенсит полностью распадается на сорбит отпуска, практически полностью снимаются внутренние напряжения, понижается прочность твердость, но возрастает пластичность. Применяют для придания изделиям ответственного назначения высокого сопротивления ударным воздействиям в сочетании с достаточной прочностью и пластичностью. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокотемпературного отпуска, называется улучшением. После нагрева изделие выдерживают в течение 1 – 2 часов. При температуре отпуска выше 500°C охлаждение производят в воде.

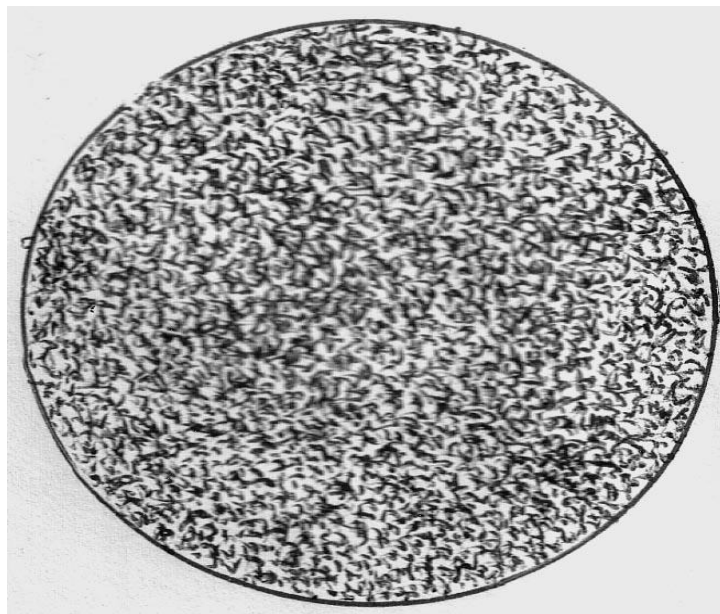


Рисунок 12 – Структура стали 40ХНМА после закалки и отпуска

Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу пластической деформации при движении трещины и снижая температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости [9].

5.4 Поверхностная закалка шеек коленчатого вала ТВЧ

Поверхностная закалка шеек коленчатого вала заключается в быстром

нагреве наружного слоя до температур аустенитного состояния и немедленной закалке. Под закаленным слоем сохраняется исходная структура стали. Глубина закалки примерно равна глубине нагрева до температуры выше критической точки; глубинные слои детали нагреваются ниже температур критических точек и при охлаждении не упрочняются. При повышении прочности сердцевины перед поверхностной закалкой деталь подвергают улучшению [8].

Выбор оптимальной толщины упрочняемого слоя определяется условиями работы детали. Когда изделие работает на износ или в условиях высоких контактных нагрузок и возможной перешлифовки, то толщина закаливаемого слоя будет 4 – 5 мм. Нагрев происходит в течение нескольких секунд и после сразу подается охлаждающая жидкость через душевое устройство. Наиболее распространенный способ закалки производится на автоматических установках с вращением (смотри рисунок 14). После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160 – 200°С или самоотпуску. Данный метод поверхностного упрочнения используется, когда необходима высокая износостойкость поверхности и мягкая сердцевина детали [8].

5.5 Выбор термического оборудования

Печи периодического действия могут классифицироваться по следующим параметрам:

Максимальная температура печи;

Атмосфера рабочей среды;

Конструкция рабочего пространства.

По температуре печи бывают низкотемпературные (до 350°С), среднетемпературные (до 1000°С) и высокотемпературные (выше 1000°С).

Для устранения деформации при нагреве коленчатые валы устанавливают в подвешенном состоянии в шахтные печи или в агрегаты с подвесной садкой.

Шахтные печи применяются для термической и химико-термической обработки длинномерных изделий, размещенных в вертикальном положении.

Печи данного типа легки в обслуживании, компактны, позволяют без проблем создать герметичность рабочего пространства, для загрузки/разгрузки можно использовать подъемно-транспортные устройства.

Недостатком является повышенный расход электроэнергии и сложность контролирования защитной атмосферы при кратковременных режимах термообработки.

Для термической обработки тяжело нагруженного вала можно использовать печь СШО15.20/12,5, эскиз которой представлен на рисунке 13.

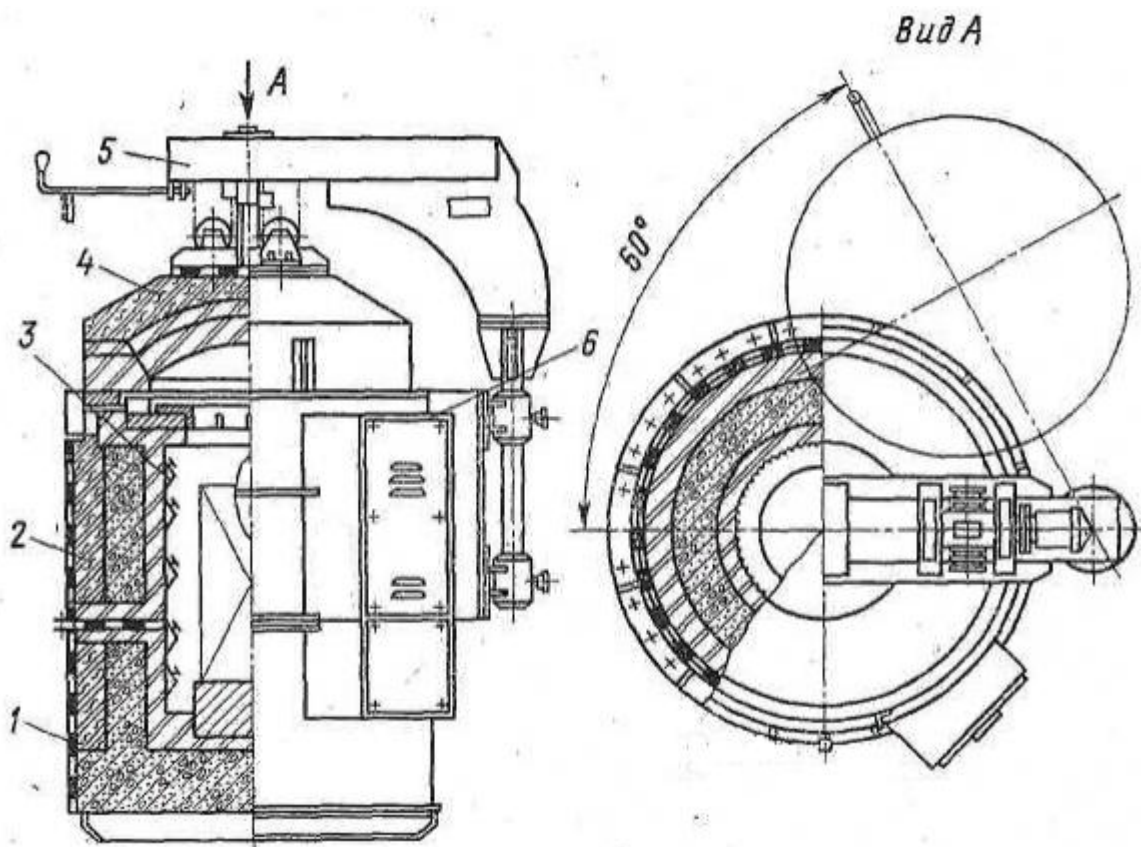


Рисунок 13 – Эскиз шахтной печи [10]: 1-кожух, 2-футеровка, 3-нагреватели, 4-крышка, 5-механизм подъема крышки, 6-панель управления.

Основные технические данные и характеристики приведены в таблице 9.

Таблица 9. Характеристики печи [10]

Технические характеристики	СШО15.20/12,5
Номинальная мощность, кВт	180
Количество зон нагрева	2
Параметры электропитания	3x380 В, 50 Гц
Макс. температура в рабочем пространстве, °С	1250
Диапазон автоматического регулирования температуры, °С	40...1250
Размеры рабочего пространства, диаметр x высота, мм	1500x2000
Габаритные размеры, диаметр x высота, мм	2500x3300
Стабильность поддержания температуры в установившемся тепловом режиме без садки, °С	±3
Механизм подъема крышки	Электропривод
Тип терморегулятора/ Тип термопары	ТРП-08 ТП / ТПП
Нагреватели	Хромали (Х23Ю5Т)
Среда в рабочем пространстве	Воздух
Вес печи, кг, ± 5%	6500

Для закалки шеек коленчатых валов ТВЧ имеются автоматические установки с вращением. В этой установке при нагреве и охлаждении коленчатый вал и индукторы находятся под слоем жидкости. Внедрение автоматических установок позволило стабильно получать валы, соответствующие требованиям чертежа и удовлетворяющие контролируемым параметрам.

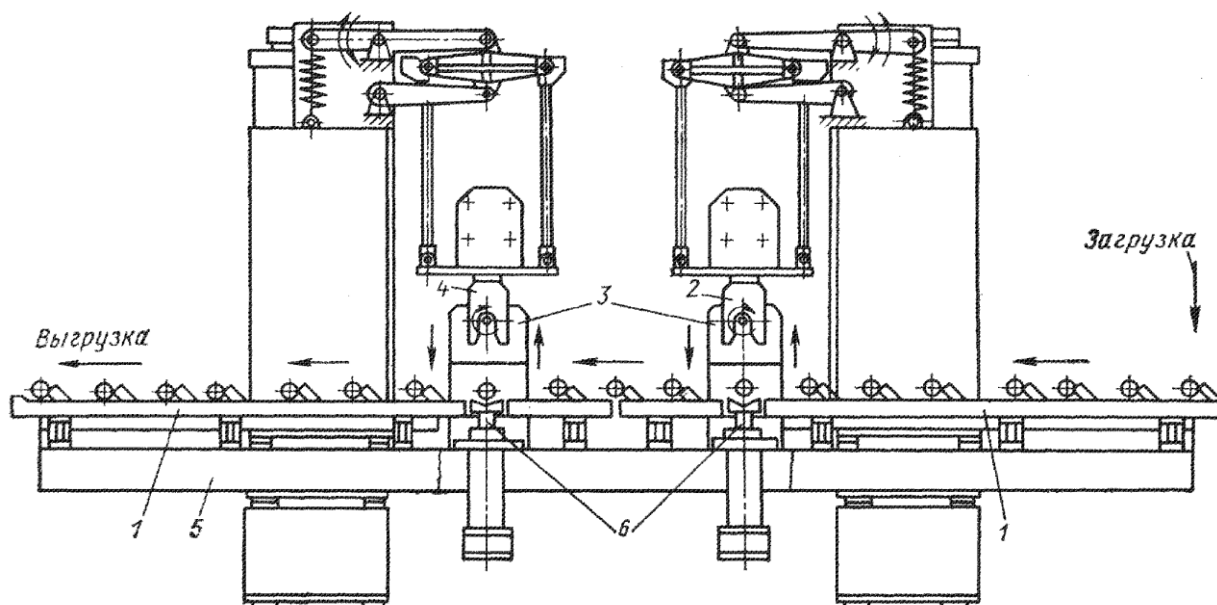


Рисунок 14 – Схема установки для закалки шеек коленчатых валов ТВЧ

Схема установки для закалки шеек коленчатых валов ТВЧ с вращением включает в себя: 1 – транспортеры; 2 – индуктор для коренных шеек; 3 – шпиндельные головки; 4 – индуктор для шатунных шеек; 5 – станина; 6 – подъемники.

5.6 Расчет времени нагрева коленчатого вала из стали 40ХНМА

Таблица 10. Исходные данные для расчетов

Марка изделия		16-03-126СП
Параметры детали, мм	длина	1550
	диаметр коренной шейки	90
Параметры печи		
Размеры рабочего пространства, мм	длина	2000
	диаметр	1500
Толщина боковой кладки, мм	Шамот класса «А»	250
	Диатомитовый кирпич Д-500	150
Толщина пода, мм	Шамот класса «А»	300
	Диатомитовый кирпич Д-500	150
Толщина свода, мм	Шамот класса «А»	300
	Диатомитовый кирпич Д-500	150

Рассчитаем время нагрева изделий из стали 40ХНМА в электрической печи периодического действия. В печь загружаются 3 заготовки. Температура нагрева изделий 870°C, температура печи 900°C. Эскиз заготовки представлен на рисунке 15.

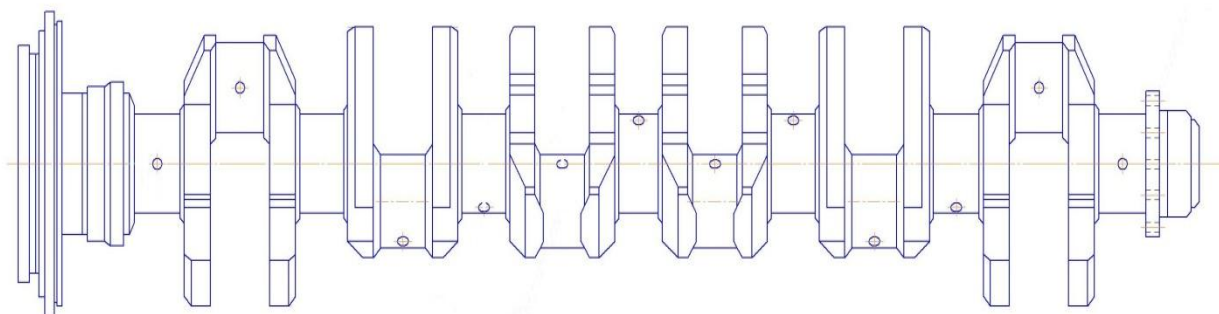


Рисунок 15 – Эскиз заготовки, подвергаемой термической обработке

После загрузки холодного изделия в печь происходит интенсивный нагрев его поверхностных слоев. Нагрев центральных слоев протекает с меньшей скоростью из-за термического сопротивления изделия.

Величина перепада температур по толщине изделия зависит от отношения термического сопротивления изделия к термическому сопротивлению передачи тепла к его поверхности. Чем больше указанное отношение, тем больше перепад температуры по толщине изделия. В теории теплообмена отношение внутреннего термического сопротивления к внешнему термическому сопротивлению на его поверхности определяется числом Био [12]:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (1)$$

где R – характерный геометрический размер изделия, в нашем случае радиус изделия;

λ – эффективная теплопроводность металла, Вт/(м·К);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

За условную границу между тонкими и массивными изделиями принимается такое сечение, для которого число Био равно 0,25.

Таким образом, если Био меньше 0,25, то изделие теплотехнически тонкое, если же Био больше 0,25, то изделие теплотехнически массивное. Зная температуру нагрева металла $t_n=870^\circ\text{C}$ определим значения теплофизических констант:

$$\lambda = 27 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$c = 0,565 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\gamma = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Коэффициент теплоотдачи считают равным сумме коэффициентов лучеиспусканием $\alpha_{\text{л}}$ и конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ [12]:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}} \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием в печи с постоянной температурой определяется по формуле [12]:

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{мср}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{п}} - T_{\text{мср}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3)$$

где $T_{\text{п}}$ – текущее значение температуры печи, К;

$T_{\text{мср}}$ – средняя температура металла, К:

$$T_{\text{мср}} = \frac{1}{3}(t_{\text{мн}} + 2t_{\text{мк}}) + 273 = \frac{1}{3}(20 + 870) + 273 = 860 \text{ К} \quad (4)$$

$C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения [12]:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{м}}} + \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{п}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{п}}} - 1 \right)}, \quad (5)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_{\text{м}}$ – степень черноты нагреваемого металла;

$\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты кладки печи;

$F_{\text{м}}$ – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м^2 ;

$F_{\text{п}}$ – поверхность, нагреваемой камеры печи, м^2 ;

$$\varepsilon_{\text{м}} = 0,8;$$

$$\varepsilon_{\text{п}} = 0,8;$$

$$F_{\text{м}} = 2\pi RL = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,095 \cdot 1,55 = 0,9247 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{п}} = 2\pi r(r + h) = 2\pi \cdot 0,75 \cdot (0,75 + 2) = 12,9525 \text{ м}^2$$

$$C_{пр} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,8} + \frac{0,9247}{12,9525} \left(\frac{1}{0,8} - 1 \right)} = 4,475$$

Найдем коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием:

$$\alpha_{л} = 4,475 \frac{\left[\left(\frac{1173}{100} \right)^4 - \left(\frac{860}{100} \right)^4 \right]}{1173 - 860} = 192,463 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией принимается от 10 до 15

Принимаем, $\alpha_{к} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Найдем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 192,463 + 12 = 204,463 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Геометрический размер изделия: $R = 0,0475 \text{ м}$.

Рассчитаем число Био:

$$Bi = \frac{204,463 \cdot 0,0475}{27} = 0,35$$

Значение числа Bi больше 0,25, следовательно, изделие относится к теплотехнически «массивным». Отсюда следует, что время нагрева будем искать по номограммам Будрина, используя относительную температуру, критерий Фурье и Био.

Относительную температуру определим по формуле [12]:

$$\theta = \frac{t_{п} - t_{пов}}{t_{п} - t_0}; \quad (6)$$

где $t_{п}$ – температура печи, °С;

$t_{пов}$ – температура поверхности изделия в печи, °С;

t_0 – начальная температура изделия, °С

Найдем относительную температуру:

$$\theta = \frac{900-870}{900-20} = 0,034$$

По номограмме для поверхности цилиндра находим критерий Фурье, который равняется $Fo = 5,12$.

Уравнение для критерия Фурье выглядит следующим образом [12]:

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2} \quad (7)$$

Из этого уравнения выразим время для нагрева изделия:

$$\tau_n = \frac{Fo \cdot R^2}{a}, \text{ с} \quad (8)$$

где R – геометрический размер изделия, равный $0,0475$ м;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = \frac{27}{565 \cdot 7850} = 0,608 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}$$

Найдем время нагрева:

$$\tau_n = \frac{5,12 \cdot 0,09^2}{0,608 \cdot 10^{-5}} = 6821 \text{ с}$$

Найдем из графика для расчета времени нагрева оси цилиндра безразмерную температуру, которая составляет $0,04$. Зная безразмерную температуру, определим температуру в сердцевине изделия [12]:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} - \theta(t_{\text{п}} - t_0) = 900 - 0,04 \cdot (900 - 20) = 864,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

					<i>22 п.3 п2 2019 п7п пп ппп п.з</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		50

Температура в центре изделия равна 864,8 °С. Необходимое для выравнивания температуры по сечению время примем исходя из следующего расчета:

$$\tau_{\text{выр}} = \tau_{\text{н}} (0,2 \dots 0,3) = 6821 \cdot 0,3 = 2046 \text{ с} \quad (10)$$

Общее время, требуемое для нагрева изделия до заданной температуры, Составит [12]:

$$\tau = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{выр}} = 6821 + 2046 = 8867 \text{ с} \quad (11)$$

Для определения времени нагрева всей садки необходимо учесть коэффициент укладки. Коэффициент укладки равен $K_{\text{расп}} = 1,3$, отсюда общее время нагрева будет составлять:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau \cdot K_{\text{расп}} = 8867 \cdot 1,3 = 11527 \text{ с} \quad (12)$$

Таким образом, общее время необходимое для прогрева деталей по сечению до заданной температуры составляет 3,2 часа.

5.7 Тепловой расчет электрической печи

Тепловой расчет печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. При проектировании электрической печи тепловой баланс составляют с целью определения мощности. Статьей прихода в электрических печах сопротивления является теплота, выделяемая нагревательными элементами, которая рассчитывается как сумма расходных статей.

Расходные статьи

Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла, для печей периодического действия определяется по формуле [12]:

$$Q_{\text{м}} = \frac{G}{\tau_{\text{н}}} \cdot c_{\text{м}} (t_{\text{мк}} - t_{\text{мн}}), \text{ Вт} \quad (13)$$

					<i>22.03.02.2019 070 00 0000 П.З</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		51

где G – масса всех изделий, кг;

c_m – средняя теплоемкость металла в интервале температур от $t_{\text{мин}}$ до $t_{\text{мак}}$, Дж/(кг·К);

τ_H – время нагрева изделий в печи, с;

$t_{\text{мин}}$ – начальная температура металла, °С;

$t_{\text{мак}}$ – конечная температура нагрева металла, °С.

$$Q_m = \frac{300}{11527} \cdot 695 \cdot (870 - 20) = 15374,7 \text{ Вт}$$

Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи [12]:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{бок.ст}} + Q_{\text{свода}} + Q_{\text{пода}}, \text{ Вт} \quad (14)$$

Потери тепла через свод, под и стены печи определяются по уравнению (для плоской многослойной стенки) [12]:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{t_n - t_0}{\frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n \cdot F_n} + \frac{1}{\alpha_B \cdot F_{\text{нар}}}}, \text{ Вт} \quad (15)$$

где t_n – температура рабочего пространства печи, °С

t_0 – температура окружающего воздуха, °С;

S_1, S_2, \dots, S_n – толщина отдельных слоев кладки, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности слоев кладки, Вт/(м К);

F_1, F_2, \dots, F_n – средние расчетные поверхности слоев кладки, м²;

α_B – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки печи в окружающую среду, Вт/(м²·К). Для электрических печей принимается равным $\alpha_B = 12$ Вт/(м²·К).

$F_{\text{нар}}$ – наружная поверхность кладки;

Потери тепла через стенку печи определяются по уравнению для цилиндрической стенки [12]:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{2\pi l(t_n - t_0)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{\text{нар}}}{r_n} + \frac{1}{\alpha_B \cdot r_{\text{нар}}}}, \text{ Вт} \quad (16)$$

где l - высота или длина цилиндрической стенки, м;

$r_{\text{нар}}$ - радиус наружной поверхности кладки, м;

r_1, r_2, \dots, r_n - радиусы соответствующих слоев кладки, м.

При условии, что $\frac{d_{i+1}}{d_i} \leq 2$ можно пользоваться формулами для плоских стенок, принимая толщину слоя $S_i = \frac{d_{i+1}-d_i}{2}$, а значения расчетных поверхностей – средними арифметическими внутренних и наружных поверхностей стенки [11].

В таблице 6 представлены теплопроводности используемых материалов футеровки.

Таблица 11. Коэффициенты теплопроводности данных материалов [12]

Классификация материала	Наименование и марка материала	λ , Вт/(м·К)
Огнеупорный	Шамот класса «А»	$0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot t$
Теплоизоляционный	Кирпич диатомитовый Д-500	$0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t$

Средние температуры первого, второго и других слоев кладки [12]:

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{1,2}}{2}; \quad t_2 = \frac{t_{1,2} + t_{2,3}}{2}; \quad t_n = \frac{t_{n-1,n} + t_{\text{нар}}}{2}.$$

где $t_{1,2}, t_{2,3}, \dots, t_{n-1,n}$ – температуры между отдельными слоями кладки, °С;

$t_{\text{п}}$ – температура внутренней поверхности футеровки равна температуре печи, °С

$t_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности кладки печи, °С.

Для того чтобы определить температуры слоев кладки и, соответственно, коэффициенты теплопроводности этих слоев, задаемся температурой наружной стенки печи и температурами на границе слоев кладки. Далее, пользуясь формулой, определяем теплотери через кладку. После этого уточняем полученные значения. Тепловые потери через кладку можно представить в виде [12]:

$$Q_{кл} = \frac{t_{п}-t_0}{R_1+R_2\dots R_n+R_{нар}}, \text{ Вт} \quad (17)$$

где R_1, R_2, \dots, R_n – тепловые сопротивления слоев кладки;

$R_{нар}$ – сопротивление передаче тепла от поверхности кладки окружающей среде.

Так как тепловой поток, проходящий через кладку, постоянен, можно записать [12]:

$$Q_{ст} = \frac{t_{п}+t_{1,2}}{R_1}; \quad Q_{ст} = \frac{t_{1,2}+t_{2,3}}{R_2}; \quad \dots, \quad Q_{ст} = \frac{t_{n-1,n}+t_{нар}}{R_n}$$

Откуда:

$$t_{1,2} = t_{п} - Q_{ст} \cdot R_1; \quad t_{2,3} = t_{п} - Q_{ст} \cdot (R_1 + R_2); \quad \dots ;$$

$$t_{нар} = t_{п} - Q_{ст} \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n).$$

Если полученные в результате проверки температуры будут отличаться от выбранных не более чем на 10 °С, то расчет произведен правильно. Если расхождение превышает эту величину, то задаемся значениями температур $t_{нар}, t_{1,2}, \dots, t_{n-1,n}$, близкими к значениям, полученным при проверке, и снова производим расчет и проверку до тех пор, пока проверка не даст хорошего совпадения.

- 1) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки боковой стенки:

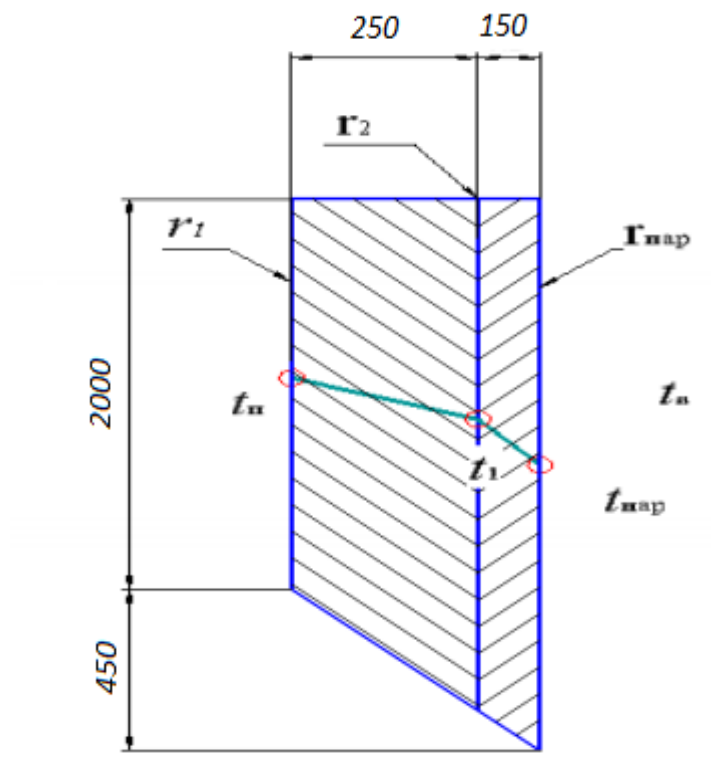


Рисунок 16 – Эскиз к расчету потерь тепла теплопроводностью через цилиндрическую стенку печи

Данные для расчета:

$$r_1 = 0,75 \text{ м}; S_1 = 0,25 \text{ м}; S_2 = 0,15 \text{ м}; h_1 = 2 \text{ м}; h_2 = 2,3 \text{ м}; h_3 = 2,45 \text{ м};$$

$$r_2 = r_1 + S_1 = 0,75 + 0,25 = 1 \text{ м};$$

$$r_3 = r_2 + S_2 = 1 + 0,15 = 1,15 \text{ м}.$$

Проверим условие $\frac{d_{i+1}}{d_i} \leq 2$: $\frac{d_2}{d_1} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \leq 2$; $\frac{d_3}{d_2} = \frac{2,3}{2} = 1,15 \leq 2$;

Так как условие выполняется можно считать по формулам для плоской стенки. Определим площади слоев кладки:

$$F_{\text{вн}} = 2\pi r_1 h_1 = 2\pi \cdot 0,75 \cdot 2 = 9,42 \text{ м}^2$$

$$F_{1,2} = 2\pi r_2 h_2 = 2\pi \cdot 1 \cdot 2,3 = 14,44 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{нар}} = 2\pi r_3 h_3 = 2\pi \cdot 1,15 \cdot 2,45 = 17,69 \text{ м}^2$$

Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата
------	------	-----------	---------	------

Рассчитаем средние площади отдельных слоев кладки:

$$F_1 = \sqrt{F_{\text{ВН}} \cdot F_{1,2}} = \sqrt{9,42 \cdot 14,44} = 11,66 \text{ м}^2$$

$$F_2 = \sqrt{F_{\text{Нар}} \cdot F_{1,2}} = \sqrt{17,69 \cdot 14,44} = 15,98 \text{ м}^2$$

Примем для расчета: $t_{\text{п}} = 900^\circ\text{C}$; $t_{1,2} = 680^\circ\text{C}$; $t_{\text{нар}} = 80^\circ\text{C}$; $t_0 = 20^\circ\text{C}$, тогда

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{1,2}}{2} = \frac{900 + 680}{2} = 790^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 790 = 1,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{1,2}}{2} = \frac{80 + 680}{2} = 380^\circ\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 380 = 0,193 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$Q_{\text{ст}} = \frac{900 - 20}{\frac{0,25}{1,18 \cdot 11,66} + \frac{0,15}{0,193 \cdot 15,98} + \frac{1}{12 \cdot 17,69}} = 12446,95 \text{ Вт}$$

Проверка:

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{0,25}{1,18 \cdot 11,66} = 0,018^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} = \frac{0,15}{0,193 \cdot 15,98} = 0,048^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$t_{1,2} = 900 - 12446,95 \cdot 0,018 = 676^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = 900 - 12446,95 \cdot (0,018 + 0,048) = 78^\circ\text{C}$$

Результаты проверки расходятся менее чем на 10°C , значит расчет верен.

2) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки пода:

					22 п.3 п2 2019 п7п пп ппп п.3	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		56

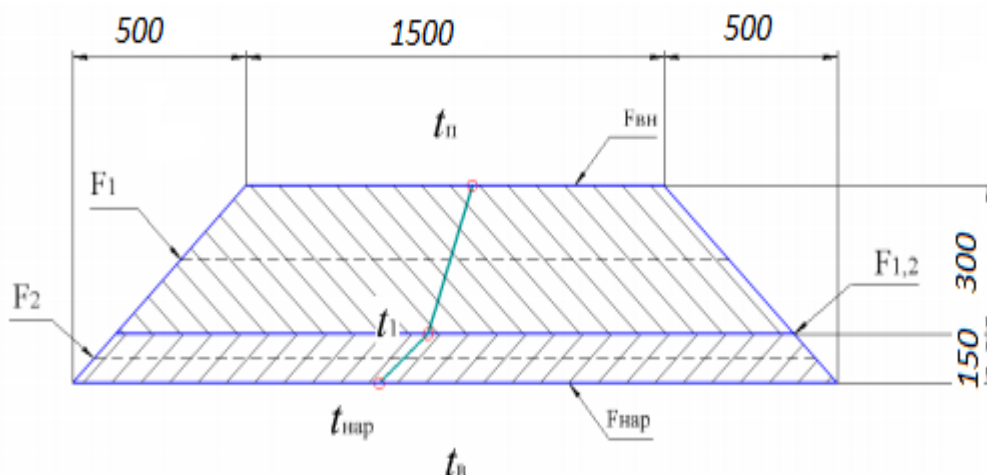


Рисунок 17 – Эскиз к расчету потерь тепла теплопроводностью через под печи

Данные для расчета:

$$r_1 = 0,75 \text{ м}; S_1 = 0,3 \text{ м}; S_2 = 0,15 \text{ м};$$

$$r_2 = r_1 + S_1 = 0,75 + 0,25 = 1 \text{ м};$$

$$r_3 = r_2 + S_2 = 1,05 + 0,15 = 1,15 \text{ м}.$$

Определим площади слоев кладки:

$$F_{\text{вн}} = \pi r_1^2 = \pi \cdot 0,75^2 = 1,76 \text{ м}^2$$

$$F_{1,2} = \pi r_2^2 = 3,46 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{нар}} = \pi r_3^2 = 4,52 \text{ м}^2$$

Рассчитаем средние площади отдельных слоев кладки:

$$F_1 = \sqrt{F_{\text{вн}} \cdot F_{1,2}} = \sqrt{1,76 \cdot 3,46} = 2,46 \text{ м}^2$$

$$F_2 = \sqrt{F_{\text{нар}} \cdot F_{1,2}} = \sqrt{4,52 \cdot 3,46} = 3,95 \text{ м}^2$$

Примем для расчета: $t_{\text{п}} = 900^\circ\text{C}$; $t_{1,2} = 620^\circ\text{C}$; $t_{\text{нар}} = 65^\circ\text{C}$; $t_0 = 20^\circ\text{C}$, тогда

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{1,2}}{2} = \frac{900 + 620}{2} = 760^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 760 = 1,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{1,2}}{2} = \frac{65 + 620}{2} = 342,5^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 342,5 = 0,184 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$Q_{\text{пода}} = \frac{900 - 20}{\frac{0,3}{1,19 \cdot 2,46} + \frac{0,15}{0,184 \cdot 3,95} + \frac{1}{12 \cdot 4,52}} = 2682,92 \text{ Вт}$$

Проверка:

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{0,3}{1,19 \cdot 2,46} = 0,102^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} = \frac{0,15}{0,184 \cdot 3,95} = 0,208^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$$

$$t_{1,2} = 900 - 2682,92 \cdot 0,102 = 624^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = 900 - 2682,92 \cdot (0,102 + 0,208) = 66^{\circ}\text{C}$$

Результаты проверки расходятся менее чем на 10°C , значит расчет верен.

3) Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки свода:

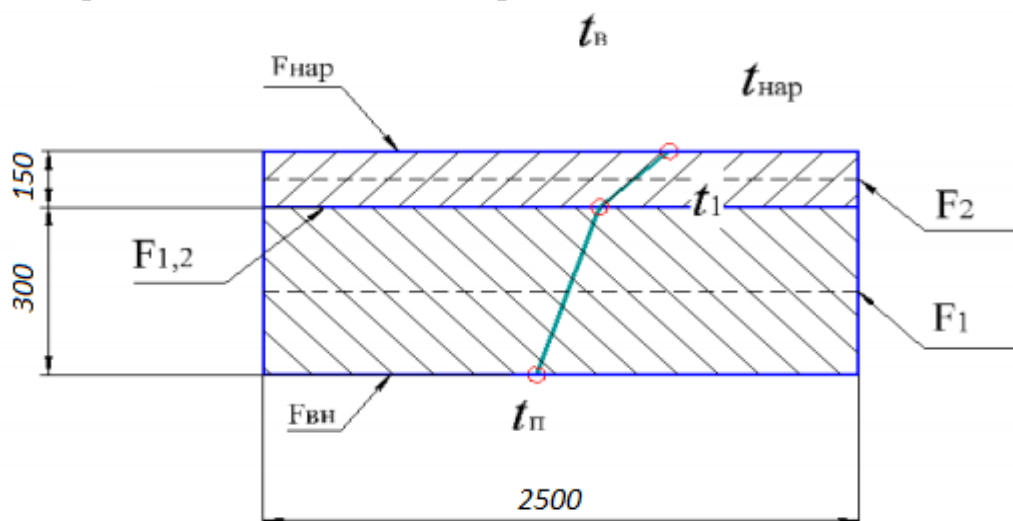


Рисунок 18 – Эскиз к расчету потерь тепла теплопроводностью через свод печи

Данные для расчета:

$$r_1 = 1,15 \text{ м}; S_1 = 0,3 \text{ м}; S_2 = 0,15 \text{ м};$$

$$r_2 = r_1 = r_3 = 1,15 \text{ м}.$$

Определим площади слоев кладки:

$$F_{\text{вн}} = F_{1,2} = F_{\text{нар}} = \pi r_1^2 = \pi \cdot 1,15^2 = 4,15 \text{ м}^2$$

$$F_1 = F_2 = 4,15 \text{ м}^2$$

Примем для расчета: $t_{\text{п}} = 900^\circ\text{C}$; $t_{1,2} = 700^\circ\text{C}$; $t_{\text{нар}} = 80^\circ\text{C}$; $t_0 = 20^\circ\text{C}$, тогда

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{1,2}}{2} = \frac{900 + 700}{2} = 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 = 0,980 + 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{1,2}}{2} = \frac{80 + 700}{2} = 390^\circ\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 390 = 0,195 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$Q_{\text{пода}} = \frac{900 - 20}{\frac{0,3}{1,2 \cdot 4,15} + \frac{0,15}{0,195 \cdot 4,15} + \frac{1}{12 \cdot 4,15}} = 3295,88 \text{ Вт}$$

Проверка:

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{0,3}{1,2 \cdot 4,15} = 0,06^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} = \frac{0,15}{0,195 \cdot 4,15} = 0,187^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$t_{1,2} = 900 - 3295,88 \cdot 0,06 = 702^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = 900 - 3295,88 \cdot (0,06 + 0,187) = 85^\circ\text{C}$$

Результаты проверки расходятся менее чем на 10°C , значит расчет верен.

					22.03.02.2019 070 00 0000 П.З	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		59

Рассчитаем тепловые потери через кладку:

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{бок.ст}} + Q_{\text{свода}} + Q_{\text{пода}} = 12446,95 + 2682,92 + 3295,88 = 18425,75 \text{ Вт}$$

Потери тепла излучением через открытое загрузочное окно

Потери тепла излучением через открытое загрузочное окно определяется по формуле [12]:

$$Q_{\text{луч}} = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \psi \cdot F_{\text{отв}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \Delta\tau, \text{ Вт} \quad (18)$$

где $\varepsilon = 0,8$ – степень черноты излучающего тела;

$F_{\text{отв}}$ – площадь поперечного сечения отверстия, м^2 :

$$F_{\text{отв}} = \pi r^2 = 3,14 \cdot 0,75^2 = 1,76 \text{ м}^2.$$

$T_{\text{п}}, T_{\text{в}}$ – температура соответственно печи и окружающего воздуха, К;

ψ – коэффициент диафрагмирования, зависящий от соотношения ширины и высоты отверстия и от толщины стенки.

Коэффициент диафрагмирования загрузочного окна: 0,9

$\Delta\tau$ – доля времени, в течение которого окно открыто, с/с;

Примем $\tau_{\text{откр}} = 6 \text{ мин} = 600 \text{ с}$ и $\tau_{\text{общ}} = 11527 \text{ с}$

Доля времени, в течение которого окно открыто: $\Delta\tau = \tau_{\text{откр}} / \tau_{\text{общ}} = \frac{600}{11527} = 0,052 \text{ с/с}$.

$$Q_{\text{луч}} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,76 \cdot \left[\left(\frac{1173}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,052 = 6774,77 \text{ Вт}$$

Потери тепла вследствие коротких замыканий

Потери тепла вследствие коротких замыканий $Q_{\text{ткз}}$, вызванных нарушением сплошности изоляции в тех местах, где через кладку проходят перемычки из более теплопроводных материалов:

- термопарные трубки;
- выводы нагревателей, направляющие, оси роликов, выходящие из печи;
- закалочные желобы и т.п.

В большинстве случаев эти потери не могут быть точно учтены и их принимают обычно равными 50...100% от потерь теплоты через стенки, то есть [12]:

$$Q_{\text{Ткз}} = (0,5 \dots 1,0) \cdot Q_{\text{ст}}, \text{ Вт} \quad (19)$$

Примем потери тепла вследствие коротких замыканий 0,5 от $Q_{\text{ст}}$, тогда

$$Q_{\text{Ткз}} = 0,5 \cdot 12446,95 = 6233,47 \text{ Вт}$$

Тепловой баланс печи

Составление теплового баланса печи:

Просуммировав приходные и расходные статьи теплового баланса, получим расчетную мощность.

Таблица 12.Тепловой баланс печи

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
Тепло, выделяемое на нагрев металла	46,7	100	Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла	15,4	33
			Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи	18,4	40
			Потери тепла через открытое загрузочное и разгрузочное окно	6,7	15
			Потери тепла вследствие коротких замыканий	6,2	12
Итого	46,7	100	Итого	46,7	100

Расчет КПД электрической печи

Коэффициент полезного действия для термических печей определяется по формуле [12]:

$$\eta = \frac{Q_M}{Q_{\text{расх}}} \cdot 100\%, \quad (20)$$

где Q_M – тепло, расходуемое на нагрев металла, кВт;

$Q_{\text{расх}}$ – суммарные затраты тепла печью, кВт;

η – коэффициент полезного действия печи, %.

$$\eta = \frac{15,4}{46,7} \cdot 100\% = 32,9 \%$$

Установленная мощность электрической печи [12]:

$$N_{\text{уст}} = k \cdot N_{\text{расч}} \quad (21)$$

где $N_{\text{расч}}$ - общий расход теплоты, Вт (кВт);

k - коэффициент запаса мощности, для печей с мощностью 100...300 кВт, принимают $k = 1,3 - 1,5$.

Примем $k = 1,5$

$$N_{\text{уст}} = 1,5 \cdot 46,7 = 70,05 \text{ кВт}$$

5.8 Расчет нагревателей электрической печи

Целью электрического расчета печей сопротивления является выбор материала нагревателей и определение их геометрических размеров при известных размерах рабочего пространства, температуре и мощности печи.

					<i>22 п.3 п2 2019 п70 пп ппп п.3</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		62

В зависимости от температуры нагрева металла выбирается материал нагревателя и его максимальная рабочая температура [12]:

$$t_n = t_m + (50 \dots 200) \text{ } ^\circ\text{C} = 870 + 100 = 970^\circ\text{C}$$

Для промышленных печей число нагревателей кратно 3, так как они включены на трехфазный ток.

Мощность одного нагревателя [12]:

$$N_1 = \frac{N_\Sigma}{n}, \quad (22)$$

где N_Σ - мощность всей печи или каждой ее зоны в кВт;

n – число нагревателей;

$$N_1 = \frac{70,5}{3} = 23 \text{ кВт}$$

Допустимая идеальная удельная поверхностная нагрузка [12]:

$$W_{\text{ид}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4}, \text{ Вт/см}^2 \quad (23)$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения

T_n – температура нагревателей, К;

$T_{m\text{cp}}$ – средняя температура металла, К

Определим допустимую идеальную удельную поверхностную нагрузку:

$$W_{\text{ид}} = 4,475 \cdot \left[\left(\frac{1243}{100} \right)^4 - \left(\frac{860}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-4} = 8,23 \text{ Вт/см}^2$$

Связь реально допустимой удельной поверхности мощности W_d и идеальной $W_{\text{ид}}$ выражается зависимостью [12]:

$$W_d = W_{\text{ид}} \cdot \alpha_{\text{эф}} \cdot \alpha_{\text{Г}} \cdot \alpha_{\text{с}} \cdot \alpha_{\text{р}} \cdot \alpha_{\text{рол}} = W_{\text{ид}} \cdot \alpha_\Sigma, \text{ Вт/см}^2 \quad (24)$$

где $\alpha_{эф}, \alpha_{т}, \alpha_{с}, \alpha_{р}, \alpha_{рол}$ – поправочные коэффициенты;

$\alpha_{эф} = 0,32$ – коэффициент эффективности излучения;

$\alpha_{т} = 1,69$ – коэффициент шага;

$\alpha_{с} = \frac{C_{пр}}{3,3} = 1,35$ – коэффициент, учитывающий зависимость $W_{д}$ от $C_{пр}$;

$\alpha_{р} = 1$ – коэффициент соотношения $F_{М}$ и $F_{СТ}$;

$\alpha_{рол} = 1$ – коэффициент затенения подовых нагревателей роликами в рольганговых печах;

Определим $W_{д}$:

$$W_{д} = 8,23 \cdot 0,32 \cdot 1,69 \cdot 1,35 \cdot 1 \cdot 1 = 6 \text{ Вт/см}^2$$

Диаметр проволоки нагревателя [12]:

$$d = 34,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{N_1^2 \cdot \rho_t}{U^2 \cdot W_{д}}}, \text{ мм} \quad (25)$$

где N_1 – мощность одного нагревателя, кВт

$\rho_t = 1,5$ – удельное электросопротивление материала, мкОм·м

$U = 380$ – напряжение питающей сети, В

$W_{д}$ – допустимая действительная удельная поверхностная нагрузка нагревателя;

Определим диаметр нагревателя из материала круглого сечения:

$$d = 34,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{529 \cdot 1,5}{144400 \cdot 6}} = 4 \text{ мм}$$

Длина проволоки нагревателя [12]:

$$L_{пр} = 0,927 \cdot \sqrt[3]{\frac{N_1 \cdot U^2}{\rho_t \cdot W_{д}^2}}, \text{ мм} \quad (26)$$

где N_1 – мощность одного нагревателя, кВт

					<i>22.03.02.2019 070 00 000 П.З</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		64

$\rho_t = 1,5$ – удельное электросопротивление материала, мкОм·м

$U = 380$ – напряжение питающей сети, В

W_d – допустимая действительная удельная поверхностная нагрузка нагревателя;

Определим длину нагревателя из материала круглого сечения:

$$L_{\text{пр}} = 0,927 \cdot \sqrt[3]{\frac{23 \cdot 144400}{1,5 \cdot 36}} = 37 \text{ м}$$

После определения размеров нагревателя производится предварительная проверка правильности выполнения расчета

Проверка расчета нагревателя:

Действительная (реальная) поверхностная нагрузка нагревателя [12]:

$$W_p = 10^3 \frac{N_1}{F_{\text{нр}}} = 10^3 \frac{23}{0,46} = 49,4 \quad (27)$$

где N_1 – мощность одного нагревателя, кВт

$F_{\text{нр}}$ – действительная (реальная) поверхность нагревателя, м²:

$$F_{\text{нр}} = l\pi d = 37 \cdot 3,14 \cdot 0,004 = 0,46 \text{ м}^2$$

$$\text{Погрешность : } \delta = \frac{W_p - W_d}{W_d} \cdot 100\% = \frac{49,4 - 6}{6} \cdot 100\% = 5 \quad (28)$$

$$\delta < 5\%$$

Температура нагревателя [12]:

$$t_n = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{W_p \cdot 10^{-4}}{C_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\Sigma}} + \left(\frac{t_m + 273}{100}\right)^4} - 273, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (29)$$

					22 П.3 П2 2019 П70 ПП ППП П.3	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		65

где W_p - действительная (реальная) поверхностная нагрузка нагревателя;

$C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения;

α_{Σ} – произведение поправочных коэффициентов;

t_m – температура металла, °С;

Проверим температуру нагревателя:

$$t_n = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{49,4 \cdot 10^{-4}}{4,475 \cdot 0,73} + \left(\frac{870+273}{100}\right)^4} - 273 = 870^\circ\text{C}$$

Полученная температура ниже допустимой для принятого материала нагревателя, значит материал нагревателя выбран верный.

Длина нагревателя в свернутом виде для спиралей [12]:

$$L_C = \frac{L_C \cdot t}{\pi D}, \text{ м} \quad (30)$$

где l_c – длина нагревателя;

t – шаг спирали;

D – диаметр спирали, мм:

$$D = (5 \dots 14) \cdot d = 6 \cdot 4 = 24 \text{ мм}$$

Определим длину нагревателя в свернутом виде:

$$L_C = \frac{37 \cdot 4}{3,14 \cdot 24} = 1,96 \text{ м}$$

Площадь нагревателей в свернутом виде [12]:

$$F_{нр} = 10^{-3} \cdot L_C \cdot D \cdot n, \text{ м}^2 \quad (31)$$

где L_C - длина нагревателя в свернутом виде, м;

D – диаметр спирали, мм;

n – число нагревателей;

Определим площадь нагревателей в свернутом виде:

$$F_{\text{нр}} = 10^{-3} \cdot 1,96 \cdot 24 \cdot 3 = 0,14 \text{ м}^2$$

Затем рассчитывается отношение $F_{\text{нр}}/ F_{\text{н}}$, которое должно составлять для спиралей 0,2...0,5. Если полученное значение попадает в указанные интервалы, то расчет можно считать законченным [11].

$$\frac{F_{\text{нр}}}{F_{\text{н}}} = \frac{0,14}{0,46} = 0,3$$

					<i>22 п.3 п2 2019 п70 пп ппп п.3</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		67

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дипломной работе были рассмотрены условия работы изделия, свойства материала, выплавка и обработка давлением, а также процесс механической и термической обработок. Было выбрано оборудование, рассчитан тепловой баланс печи и сделан расчет нагревателей. Рассчитано время нагрева заготовок в печи и время выдержки для выравнивания температуры по сечению изделия. Приведен расчет параметров свободноизлучающих нагревателей.

Рассмотрены основные статьи теплового баланса печи. Вычислена необходимая для работы установленная мощность печи, коэффициент расходования мощности на фактический нагрев металла.

					<i>22.03.02.2019 070 00 000 П.З</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		68

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 4534 – 2016.Metalлопродукция из конструкционной легированной стали. Марки. – М.: Издательство стандартов, 2015. – 50 с.
2. Попова, Л.Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана: справочник термиста / Л.Е. Попова, А.А. Попов. – Москва: Изд. Металлургия, 1991. – 264 с.
3. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия: учебник для вузов / Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 768 с.
4. Еланский, Г.Н. Основы производства и обработки металлов: учебник / Г. Н. Еланский, Б. В. Линчевский, А. А. Кальменев. – М.: МГВМИ, 2005. – 416 с.
5. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
6. Ненишев, А. С. Технология производства деталей двигателя внутреннего сгорания: учебное пособие / А.С. Ненишев, С.В. Мельник, В.П. Расщупкин, М.С. Корытов, Ю.К. Корзунин. – Омск: СибАДИ, 2009. – 92 с.
7. ГОСТ Р53444 – 2009. Автомобильные транспортные средства. Валы коленчатых двигателей. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2010. – 6 с.
8. Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали: учебное пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. – М.: УрО РАН, 1999. – 496 с.
9. Металловедение и термическая обработка сталей: справочное издание: в 3-х т. / под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г., – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Металлургия, 1983. – Т.2. – 368 с.
10. Соколов К. Н. Оборудование термических цехов / К.Н. Соколов – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев; Донецк: Вища школа. – М.: Головное изд-во, 1984. – 328 с.
11. Электротермическое оборудование: справочник / под ред. А.П. Альтгаузена, М.Я. Смелянского, М.С. Шевцова. – М.: Изд-во «Энергия», 1967. – 448 с.
12. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчеты термических печей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин. – 2-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 178 с.

					<i>22 03 02 2019 070 00 000 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		69

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	9
1.1 Условия работы изделия.....	9
1.2 Выбор материала.....	9
1.3 Описание выбранной стали.....	11
1.4 Технологические свойства стали 40ХНМА.....	15
1.5 Влияние легирующих элементов и примесей на свойства стали.....	16
2 ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ.....	18
2.1 Выбор метода и оборудования для выплавки стал.....	18
2.2 Процесс выплавки стали.....	23
2.3 Разливка стали.....	26
2.4 Анализ возможных дефектов стального слитка.....	26
3 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ.....	29
3.1 Прокатка заготовки круглого профиля.....	29
3.2 Штамповка в трехсекционном штампе.....	31
3.3 Предварительная термическая обработка.....	32
4 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.....	34
4.1 Токарная обработка коренных и шатунных шеек.....	35
4.2 Обработка внутренних плоскостей и смазочных каналов.....	36
4.3 Шлифование и отделка шеек коленчатых валов.....	36
4.4 Балансировка коленчатых валов.....	37
4.5 Контроль допустимых отклонений коленчатого вала.....	38
5 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА.....	40
5.1 Выбор термической обработки и его обоснование.....	40

					<i>22.03.02.2019 070 00 000 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.№	Подпись	Дата		6

5.2	Закалка стали 40ХНМА.....	41
5.3	Высокий отпуск стали 40ХНМА.....	42
5.4	Поверхностная закалка шеек коленчатого вала ТВЧ.....	42
5.5	Выбор термического оборудования.....	43
5.6	Расчет времени нагрева коленчатого вала из стали 40ХНМА.....	46
5.7	Тепловой расчет электрической печи.....	51
5.8	Расчет нагревателей электрической печи.....	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....		69