

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ /Михайлов Г.Г./

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Технологические процессы изготовления горячекатаных прутков из  
быстрорежущей стали

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ ВКР

Руководитель работы, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /Лапина И.В./

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор проекта

студент группы П–447

\_\_\_\_\_ /Русина К.С./

\_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер, д.т.н.проф.

\_\_\_\_\_ /Корягин Ю.Д./

\_\_\_\_\_ 2017 г.

## АННОТАЦИЯ

Русина К.С. Технологические процессы изготовления горячекатаных прутков из быстрорежущей стали. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017, 70 с., 15 ил., библиогр. Список – 13 наим., 2 листа чертежей ф.А1

В данной работе рассматриваются свойства, особенности легирования, выплавка, обработка металлов давлением, термическая обработка быстрорежущей стали Р6М5. Предложена технология отжига горячекатаных прутков из стали марки Р6М5. Проанализированы виды возможного брака и способы их устранения.

Для проведения отжига выбрана камерная печь с внешней механизацией пода. Проведены расчеты времени нагрева садки, составлен тепловой баланс печи.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ			
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата				
Разраб.	Русина К.С.				Технологические процессы изготовления горячекатаных прутков из быстрорежущей стали	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Лапина И.В.					К	6	70
Н. контр.	Корягин Ю.Д.				ЮУрГУ Кафедра МиФХМ			
Утв.	Михайлов Г.Г.							



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	9
1.1 Общая характеристика быстрорежущей стали .....	9
1.2 Описание выбранной стали .....	13
1.3 Влияние легирующих элементов и примесей на сталь Р6М5.....	15
1.4 Определение прокаливаемости стали Р6М5.....	21
1.5 Оборудование для выплавки стали Р6М5.....	22
1.6 Метод выплавки быстрорежущей стали Р6М5.....	24
1.7 Разливка стали.....	25
1.8 Обработка металла давлением.....	27
1.9 Технологический процесс термообработки стали Р6М5.....	30
1.10 Изотермический отжиг сортового проката из стали Р6М5.....	33
1.11 Контроль качества термической обработки.....	34
1.12 Анализ возможного брака и способы устранения.....	37
1.13 Сравнение выбранного материала с зарубежными аналогами.....	38
2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	39
2.1 Выбор оборудования.....	39
2.2 Общая характеристика конструкции камерной печи.....	40
2.3 Расчет горения топлива.....	42
2.4 Расчет времени нагрева сортового проката из стали Р6М5.....	49
2.5 Тепловой расчет камерной печи с внешней механизацией.....	55
2.6 Расчет КПД камерной печи.....	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	69

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## ВВЕДЕНИЕ

Инструментальные стали – это стали, которые применяются для обработки материалов резанием, давлением и имеющие определенный набор свойств в условиях эксплуатации.

Основными свойствами инструментальных сталей, применяемых для изготовления практически всех инструментов, являются: теплостойкость, твердость, износостойкость, вязкость и прокаливаемость. Кроме того, для некоторых видов инструмента большое значение имеют такие свойства, как теплопроводность, разгаростойкость, окалиностойкость, устойчивость против схватывания и налипания, механические свойства и прочее.

В настоящее время для изготовления инструмента широко применяют вольфрамомолибденовые стали, в частности сталь Р6М5. Ее рекомендуется применять в промышленности для изготовления инструментов (резцы, сверла, фрезы, протяжки, метчики и т.д.). С помощью термической обработки, в сочетании с оптимальным легированием, достигается их высокая надежность и долговечность в условиях эксплуатации.

В данной работе рассмотрена технология изготовления горячекатанных прутков из быстрорежущей стали Р6М5.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Общая характеристика быстрорежущих сталей

Инструментальные стали – это группа сталей, которые в результате термической обработки получают высокую твердость, прочность, вязкость и износостойкость, необходимые для обработки резанием или давлением. Большинство инструментальных сталей обладают теплостойкостью, т.е. способностью сохранять свои свойства при нагреве, часто возникающим в рабочей кромке инструментов [1].

Инструментальные стали по химическому составу могут быть распределены условно на две большие группы [1]:

- 1) углеродистые мало легированные, содержащие до 4-5% легирующих элементов;
- 2) высоко- и сложнелегированные, содержащие > 5 (даже до 40-45%) легирующих элементов.

Классификация по свойствам, прежде всего по теплостойкости является наиболее важной, так как она одновременно характеризует природу упрочнения, вызываемого термической обработкой и определяющего условия использования сталей для инструмента.

Инструментальные стали рационально разделить на три группы [1]:

- 1) нетеплостойкие;
- 2) полутеплостойкие;
- 3) теплостойкие.

Нетеплостойкие стали приобретают высокую твердость, износостойкость и прочность в результате мартенситного превращения при закалке. Однако эти свойства сохраняются лишь при невысоком нагреве. По химическому составу – углеродистые, менее легированные.

К полутеплостойким сталям относятся – высокохромистые (3–18% Cr), высокоуглеродистые ( $> 1,5\%$  C), главным образом ледебуритные, подобно нетеплостойким сталям, они приобретают высокую твердость и прочность в результате мартенситного превращения при закалке. Однако при отпуске 250–400°C в них выделяются карбиды хрома и легированный цементит, обладающий большей устойчивости коагуляции, вследствие чего эти стали сохраняют повышенную твердость до более высоких температур [1].

К теплостойким сталям относятся высоколегированные стали, приобретающие высокую твердость, прочность и износостойкость в результате двойного упрочнения:

- а) мартенситного при закалке;
- б) дисперсного твердения при относительно высоком отпуске (500-625°C), вызываемого выделением упрочняющих фаз.

Этими фазами для многих сталей являются сложные карбиды вольфрама, молибдена, и также карбиды ванадия, создающие карбидное упрочнение, а у некоторых сталей и сплавов – интерметаллиды, создающие интерметаллидное упрочнение. Свойства, полученные термической обработкой, сохраняются при высоком нагреве [1].

Стали с карбидным упрочнением при повышенном содержании углерода  $> 0,6\%$  называют быстрорежущими, и они представляют одну из наиболее характерных и часто применяемых групп инструментальных сталей.

Таким образом, нетеплостойкие и теплостойкие стали мало различаются по твердости, прочности и износостойкости при нормальных температурах, но значительно различаются по этим свойствам при нагреве.

Износостойкость инструментальной стали определяется в основном твердостью ее основной массы при рабочей температуре, количеством и твердостью карбидной фазы. Износостойкость стали зависит от структуры и свойств инструментальной стали и в большой степени от свойств обрабатываемого материала: его твердости, создаваемого им абразивного и коррозионного воздействия, коэффициента трения и от внешних условий, при

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

которых происходит изнашивание, температура, развивающейся в зоне трения и механических воздействий.

Твердость – важнейшее свойство инструментальных сталей, является главным показателем качества инструмента. Получение требуемой твердости определяется химическим составом и термической обработкой стали.

Вязкость, характеризующая сопротивление образованию трещин и разрушению под действием ударных нагрузок, не менее важное свойство инструментальных сталей. Чаще всего повышение твердости вызывает понижение вязкости, и наоборот.

Инструментальные стали по твердости и вязкости подразделяются:

- стали высокой твердости и износостойкости, но пониженной вязкости. Эти стали содержат 0,7–1,5% С и имеют твердость (HRC 58–68);
- стали повышенной вязкости, но более низкой твердости и износостойкости. Они содержат 0,4–0,7% С и твердость в пределах (HRC 45–50).

Прокаливаемость инструментальных сталей характеризует твердость инструмента по сечению; она определяется устойчивостью переохлажденного аустенита. По прокаливаемости инструментальные стали делят на стали небольшой прокаливаемости (углеродистые и низколегированные), стали повышенной прокаливаемости (более легированные) и стали высокой прокаливаемости (высоколегированные) [2].

В зависимости от условий эксплуатации и требуемых свойств различают следующие группы инструментальных сталей [1]:

Группа 1. Стали для режущих инструментов.

Группа 2. Штамповые стали для холодного деформирования.

Группа 3. Штамповые стали для горячего деформирования.

Группа 4. Стали для инструментов высокой точности.

Для режущих инструментов чаще всего используют быстрорежущие стали, эти стали сочетают теплостойкость (600 – 700°C) с высокой твердостью (HRC 63 – 70) и повышенным сопротивлением пластической деформации. Применяя быстрорежущие стали, возможно, увеличить скорость резания в 2 – 4 раза и



повысить стойкость инструментов. Уникальные свойства быстрорежущих сталей достигается посредством специального легирования и сложной термической обработки, обеспечивающих определенный фазовый состав.

Режущие инструменты находятся в эксплуатации в сложнапряженном состоянии. Прежде всего, они испытывают очень высокие контактные напряжения (3000 – 5000 МПа и более) и высокие удельные давления на рабочую кромку, необходимые для деформирования и разрушения (резания) обрабатываемого материала. Инструменты подвергаются также воздействию повышенных напряжений изгиба и кручения; максимальный изгибающий или крутящий момент возникает главным образом в участках, несколько удаленных от контактирующей поверхности, например, в основании зуба фрезы, метчика и т.д. В некоторых инструментах могут, кроме того, возникать растягивающие напряжения [3].

Работе ряда инструментов сопутствуют ударные нагрузки или вибрации, не устраняемые полностью в системе станок – обрабатываемая деталь – инструмент или создаваемые условиями резания, например при сквозном сверлении, при работе многолезвийного инструмента. Рабочая кромка инструмента испытывает тепловое воздействие за счет тепла, выделяющегося при резании. С увеличением скорости резания усиливается выделение тепла и повышается температура рабочей кромки [3].

Таким образом, стали для режущего инструмента (резцы, свёрла, фрезы, протяжки, метчики) должны обладать высокой твердостью режущей кромки, высокой прочностью и сопротивлением малой пластической деформации, необходимой теплостойкостью [3].

## 1.2 Описание выбранной стали

Долгое время в СССР (до 70-х годов) наиболее широко использовали вольфрамовые стали без молибдена (марки Р18, Р12, Р9). Однако острая дефицитность вольфрама привела к частичной его замене молибденом. Замену вольфрама молибденом проводят, исходя из соотношения  $Mo:W = 1:1,5$ , однако общее содержание молибдена в стали не должно быть более 5 %. Считается, что наиболее оптимальные свойства и рациональная стоимость инструмента достигается при соблюдении условия  $2(W+1,5 Mo)=12—13$  %. По этому принципу построена наиболее широко применяемая в настоящее время сталь Р6М5 [1].

Для изготовления инструмента широко применяют вольфрамомолибденовую сталь, Р6М5. Ее рекомендуется применять в промышленности для изготовления инструментов, работающих:

- в тяжелых условиях, когда необходима их повышенная износостойкость (фрезы, протяжки, метчики, сверла и др.);
- в условиях динамических нагрузок (долбяки, сегментные пилы, резцы для прерывистого точения и др.);
- при больших подачах, когда от режущего инструмента требуется повышенная механическая прочность (червячные фрезы, обдирочные резцы и др.).

Химический состав стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73) представлен в таблице 1.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 1 – Химический состав стали Р6М5 (% весовые)

С	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Ni	S	P
							не более		
0,82 – 0,90	0,2 – 0,5	0,2 – 0,5	3,8 – 4,4	5,5 – 6,5	1,7 – 2,1	4,8 – 5,3	0,6	0,025	0,03

Критические точки данной стали, приведены в таблице 2 [4].

Таблица 2 – Температура критических точек стали Р6М5 (°С)

Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>cm</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>cm</sub>	M <sub>H</sub>
815	880	730	790	140

Механические свойства и твердость стали Р6М5 должны соответствовать нормам (ГОСТ 19265-73), указанным в таблице 3 и 4.

Таблица 3 – Механические свойства стали Р6М5

Режим термической обработки	HRC после отпуска	$\sigma_{изг}$ , МПа	Красностойкость (HRC <sup>59</sup> ), °С
Закалка с 1200 – 1230 °С, охл. на воздухе, в масле, в расплаве солей; отпуск при 540 – 560 °С, охл. в соляных ваннах	63 – 65	320 – 360	620

Таблица 4 – Значения твердости стали после термической обработки

Марка стали	Твердость			Температура, °С	
	После отжига		После закалки с отпуском, HRC, не менее	Закалки	Отпуска
	HВ, не более	Диаметр отпечатка, мм, не менее			
Р6М5	255	3,8	63	1220	550

Абсолютное значение ударной вязкости стали Р6М5 при комнатной температуре равно 60 МДж/м<sup>2</sup>.

Хром, содержащийся в стали в количестве 3,8...4,4 %, обеспечивает хорошую ее закаливаемость и в крупных сечениях. Сталь Р6М5 имеет хорошую свариваемость при стыковой электрической контактной сварке, а также отличается хорошей шлифуемостью. К недостаткам можно отнести повышенную склонность к обезуглероживанию.

### 1.3 Влияние легирующих элементов и примесей на сталь Р6М5

Главной целью легирования стали является достижение важнейших отличительных свойств – теплостойкости и износостойкости.

Основными легирующими элементами быстрорежущих сталей, обеспечивающими высокую теплостойкость, являются вольфрам, молибден, ванадий. Кроме них, все стали легируют хромом, а некоторые — кобальтом. Важным компонентом является углерод. Сильное влияние главных легирующих элементов – вольфрама, молибдена, хрома, ванадия – на фазовый состав быстрорежущей стали определяется тем, что они образуют стойкие карбиды.

Вольфрам, молибден, ванадий и хром уменьшают содержание углерода в эвтектоиде и предельную концентрацию углерода в аустените (рисунок 1).

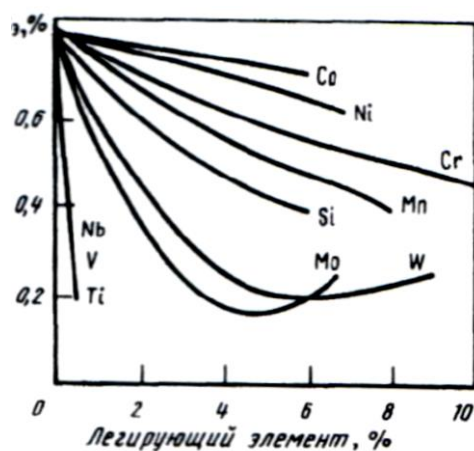


Рисунок 1 – Влияние легирующих элементов на содержание углерода в эвтектоиде (C<sub>ε</sub>)

По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы: карбидообразующие и некарбидообразующие. Вольфрам, молибден и хром являются карбидообразующими элементами и обладают средней карбидообразующей способностью. При небольших концентрациях растворяются в цементите, замещая атомы железа. В результате образуют легированный цементит  $Me_3C\{(Fe,Cr)3C\}$ , а при достаточно высоких концентрациях в стали образуется специальные карбиды  $Me_6C\{(Fe, Mo, W)6C\}$ ,  $Me_{23}C_6\{(Fe, Mo, W)23C6\}$ . Ванадий является сильным карбидообразующим элементом, в цементите практически не растворяется и уже при малых содержаниях в стали образует собственные специальные карбиды  $MeC\{VC\}$  [5].

Рассмотрим влияние легирующих элементов на образование аустенита. Карбидообразующие элементы хром, молибден, вольфрам и ванадий замедляют образование аустенита, если они находятся в твёрдом растворе. Карбидообразующие элементы в существенной мере влияют на поведение карбидной фазы при нагреве. Находясь в цементите, они увеличивают энергию межатомных связей и затрудняют его растворение. Специальные карбиды растворяются при более высоких температурах нагрева, чем цементит. Чем выше карбидообразующая способность элемента, тем труднее растворяется карбид.

Более устойчив к растворению является карбид VC. Находясь в аустените, карбидообразующие элементы, как правило, понижают термодинамическую активность углерода, вследствие чего способствуют переходу карбидов в аустенит.

Гомогенизация аустенита в легированных сталях протекает значительно дольше, чем в углеродистых. Неравномерное распределение легирующих элементов между ферритом и карбидами в исходном состоянии приводит к тому, что при нагреве, когда образуется аустенит и растворятся карбиды, аустенит будет неоднороден как по углероду, так и по легирующим элементам [5].

Рассмотрим влияние легирующих элементов на рост зерна аустенита. Легирующие элементы, находящиеся в твёрдом растворе, имеют сложный характер влияния на склонность роста аустенитного зерна. Рост зерна аустенита зависит не только от содержания легирующих элементов, но и от состава основы стали и температуры нагрева. Хром, не связанный в карбиды, мало влияет на рост аустенитного зерна. Такие элементы как Mo, V и Cr, образующие специальные карбиды и нитриды, уменьшают склонность к росту зерна аустенита. И чем устойчивее эти фазы при нагреве стали, тем до более высоких температур сохраняется мелкое зерно [5].

На диффузионное превращение легирующие элементы оказывают весьма сложное влияние. Так молибден существенно замедляет диффузионное превращение, а вот хром – несколько слабее. Изменения в интенсивности распада переохлажденного аустенита обусловлены уменьшением как скорости образования зародышей, так и линейной скорости их роста, причём решающее значение обычно имеет последний фактор. Легирующие элементы также могут влиять на температуру, соответствующую максимальной скорости распада переохлажденного аустенита. Молибден, вольфрам, хром заметно повышают эту температуру. И также способствуют интенсивному замедлению образования эвтектоида и ещё слабее замедляют выделение избыточного феррита.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Большинство легирующих элементов смещают интервал промежуточного превращения в сторону более низких температур. Все легирующие элементы в той или иной мере затрудняют промежуточное превращение. Хром в значительной степени тормозит кинетику превращения, а молибден и вольфрам слабее. Но стоит заметить, что их влияние на промежуточное превращение заметно слабее, чем на диффузионное [5].

В сталях большинство легирующих элементов снижают температуру начала мартенситного превращения (рисунок 2). Если сталь содержит несколько легирующих элементов, то их действие на точку Мн не может быть определено простым суммированием, так как эффективность того или иного легирующего элемента зависит не только от его концентрации, но и от присутствия других элементов. При различном содержании углерода влияние легирующих элементов на точку Мн также может быть различным.

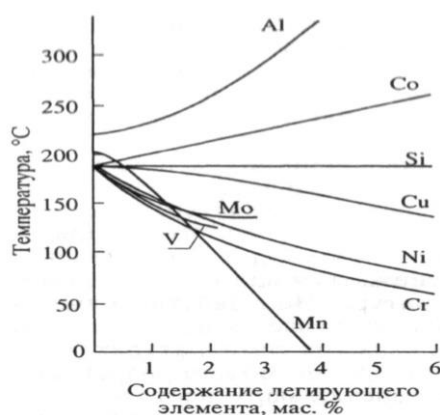


Рисунок 2 – Влияние легирующих элементов на положение мартенситной точки Мн

При отпуске хром, вольфрам, ванадий и молибден резко тормозят однофазный распад мартенсита, замедляя выделение углерода из твёрдого раствора и рост карбидных частиц. В сталях, содержащих эти элементы, этот процесс сдвигается в сторону более высоких температур (420...560°C). При температурах выше 420...460°C, происходит выделение специальных карбидов, что приводит к вторичному (дисперсионному) твердению стали. Указанные легирующие элементы

затрудняют и распад остаточного аустенита. Затрудняя распад мартенсита при нагреве, так же обеспечивают высокую теплостойкость [5].

Вольфрам и молибден являются основными легирующими элементами, обеспечивающими теплостойкость. Вольфрам (молибден) образует в стали карбид  $Me_6C_2$ , который при аустенитизации частично переходит в твердый раствор, обеспечивая получение после закалки легированного вольфрамом (молибденом) мартенсита. Эти легирующие элементы, а также ванадий затрудняют распад мартенсита при нагреве, обеспечивая необходимую теплостойкость. Нерастворенная часть карбида  $Me_6C$  приводит к повышению износостойкости стали. Таким образом, без вольфрама или молибдена не может быть быстрорежущей стали. Наличие в стали высокого содержания вольфрама приводит к ухудшению теплопроводности стали, что вызывает осложнения при обработке давлением и необходимость замедленного (ступенчатого) нагрева стали под закалку во избежание появления трещин. Кроме того, вольфрамовые стали склонны к сильной карбидной неоднородности. Частичная замена вольфрама молибденом уменьшает этот недостаток.

Ванадий образует в стали наиболее твердый карбид VC ( $MeC$ ) (HV 2700—2800). Максимальный эффект от введения в сталь ванадия достигается при условии, что содержание углерода в стали будет достаточным для образования большого количества карбидов и для насыщения твердого раствора. Карбид  $Me_6C$ , частично растворяясь в аустените, увеличивает теплостойкость и повышает твердость после отпуска благодаря эффекту дисперсионного твердения. Нерастворенная часть карбида  $Me_6C$  увеличивает износостойкость стали. Чем выше содержание ванадия в быстрорежущих сталях (а оно доходит до 5 %), тем выше износостойкость вследствие увеличения количества самого твердого карбида. Однако при этом ухудшается шлифуемость стали.

Хром во всех быстрорежущих сталях содержится в количестве около 4 %. Он является основой карбида  $Me_{23}C_6$ . При нагреве под закалку этот карбид полностью растворяется в аустените при температурах, значительно более низких, чем температуры растворения карбидов  $Me_6C$  и  $Me_6C$ . Вследствие этого основная роль

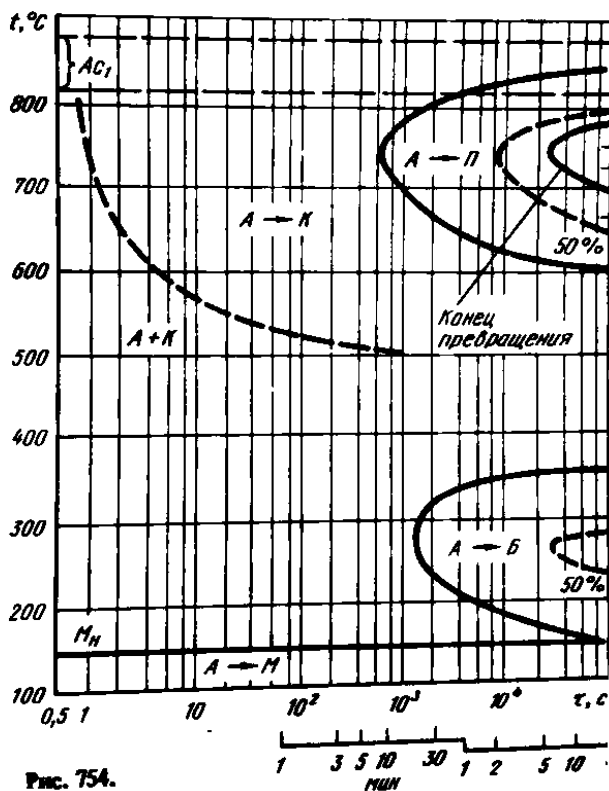
					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19



хрома в быстрорежущих сталях состоит в придании стали высокой прокаливаемости. Он оказывает влияние и на процессы карбидообразования при отпуске.

На диаграмме изотермического распада аустенита стали Р6М5 (рисунок 3). Аустенитная фаза в интервале температур 625–350°С чрезвычайно устойчива и практически в течении обозримого времени не претерпевает изменений. Выдержка при охлаждении до температур не изменяет положение начало мартенситного превращения и при последующем охлаждении устойчивость аустенита не отличается от обычной.

В интервале температур бейнитное превращение 300–200°С время превращения является самым коротким.



Рисунке 3 – Диаграмма изотермического распада аустенита стали Р6М5[4]

Чтобы получить мартенситную структуру при закалке сталь необходимо охлаждать со скоростью не меньшей, чем верхняя критическая скорость закалки. Значение  $V_{ВКЗ}$  определяем с помощью диаграммы изотермического превращения переохлаждённого аустенита (рисунок 3).

$$t_{зак} = A_{c1} + (40 - 60^\circ),$$

$$V_{ВКЗ} = \frac{A_1 - t_{min}}{1,5 \cdot \tau_{min}}. \quad (1)$$

По диаграммам найдем:  $t_{min}$ ,  $\tau_{min}$  и подставим найденные значения в формулу (1), получаем для стали Р6М5 ( $t_{min} = 285^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{min} = 1000$  с,  $A_1 = 820^\circ\text{C}$ ):

$$V_{ВКЗ} = \frac{820 - 285}{1,5 \cdot 1000} = 0,36^\circ/\text{с}$$

#### 1.4 Определение прокаливаемости стали Р6М5

Сталь Р6М5 относится к высокопрокаливающимся сталям, которые закаливаются при охлаждении на воздухе в сечениях до 100 мм и более. Поэтому метод торцевой закалки для них неприменим. Для оценки прокаливаемости этих сталей, в том числе теплостойких, более точны методы, основанные на тепловом моделировании, и предусматривают замену массы металла теплоизоляционным слоем, например асбестом. Теплоизоляционный слой должен обеспечивать отдачу тепла образцом только через торцы. Следовательно, скорость охлаждения изоляции не должна отличаться от скорости охлаждения образца и между изоляцией и образцом не должно быть теплообмена. Поэтому толщину изоляционного слоя устанавливают в зависимости от толщины образца [1].

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

## 1.5 Оборудование для выплавки стали Р6М5

Условия металлургического передела оказывают определяющее влияние на характерную структурную составляющую наиболее важных инструментальных сталей – заэвтектоидных и главным образом ледебуритных, а именно на особенности распределения карбидных частиц, их размеры и форму.

В связи с этим применяют два принципиально различных способа производства инструментальных сталей:

- 1) металлургический передел, общепринятый для большинства сталей с выплавкой в печах ДСП;
- 2) методами порошковой металлургии.

Большинство инструментальных сталей легированных и высококачественных углеродистых выплавляют в электрических печах; некоторые из них, кроме того, переплавляют в вакууме или электрошлаковым переплавом, подвергают тщательному плавочному контролю и для уменьшения ликвации, особенно карбидной, отливают в слитки относительно небольших размеров.

Изменение металлургического передела влияет главным образом на механические и некоторые технологические свойства (ковкость, штампуемость).

Для выплавки быстрорежущей стали применяют дуговую сталеплавильную печь. Основные её преимущества заключаются в возможности: быстро нагревать металл, что позволяет вводить в печь большие количества легирующих элементов; плавно и точно регулировать температуру металла, раскислить металл, получая его с низким содержанием неметаллических включений; получать сталь с низким содержанием серы.

Схема современной высокопроизводительной трехфазной дуговой электропечи представлена на рисунке 4. Ввиду необходимости разлива на мелкие слитки плавку следует вести в печах емкостью до 10 т., не более 20 т.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

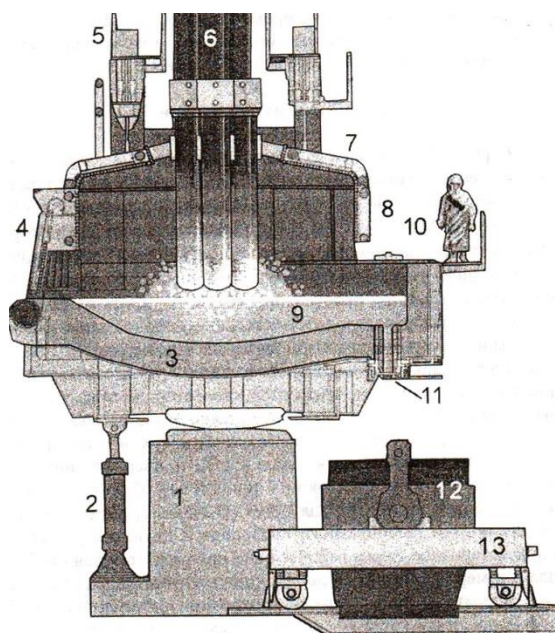


Рисунок 4 - Схема современной высокопроизводительной трехфазной дуговой электропечи [7]

1 – фундамент; 2 – гидравлический привод наклона печи; 3 – подина; 4 – рабочее окно; 5 – механизм подъема и отворота свода; 6 – графитизированные электроды; 7 – водоохлаждаемый свод; 8 – водоохлаждаемые стены; 9 – расплавленный металл и шлак; 10 – площадка обслуживания выпускного отверстия; 11 – эксцентрично расположенное выпускное отверстие; 12 – сталеразливочный ковш; 13 – сталеvoz

Дуговая печь состоит из рабочего пространства (собственно печи) с электродами и токоподводами и механизмов обеспечивающих наклон печи, удержание и перемещение электродов, и загрузку шихты [6].

Шихтовые материалы загружают на под печи, после их расплавления в печи образуется слой металла и шлака. Плавление и нагрев осуществляется за счет тепла электрических дуг [6].

Выпуск готовой стали и шлака осуществляется через сталеvпускное отверстие. Рабочее окно предназначено для контроля над ходом плавки, ремонта пода и загрузки материалов [6].

## 1.6 Метод выплавки быстрорежущей стали Р6М5

Плавка быстрорежущей стали на свежей шихте требует присадки в восстановительный период значительного количества ферровольфрама, ферромolibдена, феррованадия, феррохрома, составляющего около половины массы жидкого металла в печи. Поэтому ее целесообразно вести методом переплава легированных отходов. При этом переплав возможен без окисления и с окислением продувкой кислородом [8].

Первый из этих методов применяют тогда, когда имеются легированные отходы, близкие по составу к выплавляемой стали. Таких отходов дают до 80 % металлической шихты. Остальное составляют ферровольфрам, ферромolibден, феррохром, мягкое железо. Фосфор по ходу плавки из металла не удаляется, что необходимо учитывать при шихтовке.

Перед завалкой в печь загружают известь, плавиковый шпат, бой шамота в количестве 1 % от массы металлической шихты. При загрузке в бадью ферровольфрам и ферромolibден помещают поверх всей шихты в центре бадьи, так, чтобы при завалке в печь эти тугоплавкие ферросплавы располагались между электродами. Феррохром размещают по периферии бадьи, а мягкое железо между этими ферросплавами.

Плавление ведут на максимальной мощности для его ускорения и уменьшения потерь легирующих элементов. По ходу плавления производят корректирующие добавки извести и плавикового шпата. С увеличением основности шлака повышаются потери вольфрама.

Оптимальная основность  $(\% \text{CaO})/(\% \text{SiO}_2) = 1$  [9].

По ходу плавки ванну необходимо перемешивать металлическими гребками для равномерного распределения вольфрама. Такая необходимость вызвана тем, что ферровольфрам медленно растворяется в металле и часть его может остаться на подине.

Для уменьшения потерь легирующих элементов шлак из печи не скачивают или скачивают частично после раскисления.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

Восстановительный шлак после полного расплавления наводят присадками порошка кокса и ферросилиция, а также извести, повышая основность до значения  $(\%CaO)/(\%SiO_2) - 1,5-2,0$ . Для более полного восстановления легирующих элементов, шлак в конце восстановительного периода дополнительно раскисляют алюминием и силикокальцием [8].

Для интенсификации процесса плавку ведут с частичным окислением продувкой ванны кислородом. При этом для уменьшения потерь легирующих элементов в состав шихты вводят ферросилиций в количестве, соответствующем 0,5 % Si. Окисление кремния вызывает нагрев металла. Это, а также интенсивное перемешивание при продувке кислородом, ускоряет плавление шихты и растворение ферровольфрама и ферромolibдена, повышая усвоение W и Mo. Этому же способствует быстрое образование шлака при продувке кислородом. После продувки кислородом проводят восстановительный период как описано выше[8].

### 1.7 Разливка стали

Выплавленную в сталеплавильном агрегате сталь выпускают в разливочный ковш и направляют на машины непрерывного литья. В результате затвердевания получают стальные слитки, в дальнейшем подвергаемые обработке давлением.

Преимущества получения заготовок на МНЛЗ (машина непрерывного литья заготовок) заключается в значительном сокращении производственного цикла получения готового проката, а также капитальных затрат и в значительном повышении качества заготовок за счет однородности строения слитка и резким снижением расхода металла.

Производство заготовки (блюда) из стали Р6М5 осуществляется на МНЛЗ радиального типа. Схема МНЛЗ радиального типа представлена на рисунке 5.

На МНЛЗ радиального типа кристаллизатор и направляющие устройства изогнуты по дуге постоянного радиуса, что значительно уменьшает высоту машины. На этих МНЛЗ достигаются более высокие скорости разливки за счет изменения длины участка вторичного охлаждения и высокой степени

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

автоматизации, а, следовательно, производительности и качества готовой продукции. МНЛЗ обычно имеют несколько ручьев, на которых одновременно отливаются непрерывнолитые заготовки, а число их зависит от емкости сталеразливочного ковша [9].

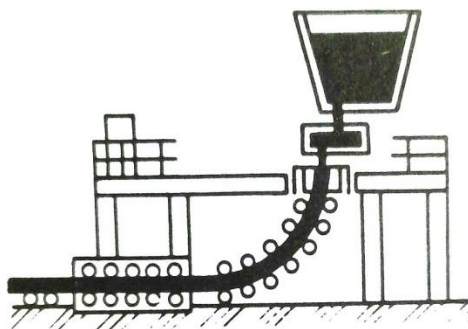


Рисунок 5 – Схема МНЛЗ радиального типа

При кристаллизации (затвердевании) расплава быстрорежущей стали последовательно выделяются карбиды при разных температурах охлаждения. Сложный состав быстрорежущей стали вызывает возникновение широкого температурного интервала кристаллизации и образование кристаллизующихся фаз (металлической основы и карбидов) разного состава и плотности. В процессе кристаллизации вначале образуются зерна твердого раствора в  $\gamma$ -Fe, а затем по границам зерен легкоплавкая эвтектика из карбидов и аустенита. При последующем охлаждении из аустенита выделяются вторичные карбиды. Чем медленнее скорость кристаллизации, тем более неравномерное распределение карбидов и более грубые выделения эвтектики по границам зерен [8].

Эти дефекты структуры, сильно ухудшающие прочность и вязкость, в значительной степени устраняются при последующей горячей деформацией. Сетку эвтектики можно полностью разрушить только при 30–40-кратном уменьшении сечения при обработке давлением.

## 1.8 Обработка металла давлением

Под обработкой металлов давлением подразумевают комплекс технологических операций, при помощи которых производят уменьшение площади и изменение формы поперечного сечения металлических заготовок без нарушения их сплошности и удаления частей металла.

На большинстве заводов прокатке подвергают слитки сравнительно небольшой массы (200—400 кг). С увеличением их массы прокатка усложняется.

Нагрев слитков и заготовки быстрорежущей стали из-за малой теплопроводности, почти в три раза меньшей, чем у железа, и чувствительности к возникновению трещин производят достаточно осторожно, в особенности, если металл перед нагревом не подвергали отжигу. Продолжительность нагрева должна быть достаточной для обеспечения равномерного и полного прогрева слитков и заготовок.

Пластичность быстрорежущей стали увеличивается с повышением температуры, которая при нагреве не должна превышать 1200 – 1230 °С. При более высокой температуре происходит оплавление границ зерен. Температура в конце прокатки должна быть не ниже 900 °С.

Прокатку сортовых профилей (круглых, квадратных, прямоугольных) различных размеров производится на средне-, мелкосортных и проволочных станах. Прокатывают заготовку сечением 80×80 или 50×80 мм массой 60 кг. В связи с заметным повышением сопротивления деформации и уменьшением пластичности быстрорежущей стали при понижении температуры прокатку на всех переделах следует вести при максимальной температуре [10].

Охлаждение быстрорежущей стали после прокатки является важной операцией технологического процесса: при быстром охлаждении сталь склонна к образованию закалочных (холодных) трещин. Поэтому ее подвергают медленному охлаждению или изотермическому отжигу. Медленное охлаждение мелкого сорта и катанки производят в термостатах, колодцах или печах.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27



Для прокатки среднесортных, нормальных и тонкостенных балок и швеллеров с параллельными полками, а также круглой стали диаметром 32 – 60 мм, квадратной – со стороной 30 – 53 мм, полосовой – толщиной 9 – 22 мм и шириной 125 – 200мм, угловой – с полками шириной 75 – 125 мм предназначен 16-клетевой непрерывный среднесортный стан 450. Схема расположения оборудования непрерывного среднесортного стана 450 показана на рисунке 6. Стан включает, три черновые группы из трех клеток каждая и одну чистовую группу. В каждой черновой группе последовательно установлены горизонтальная, комбинированная, горизонтальная с диаметром валков 630 мм [9].

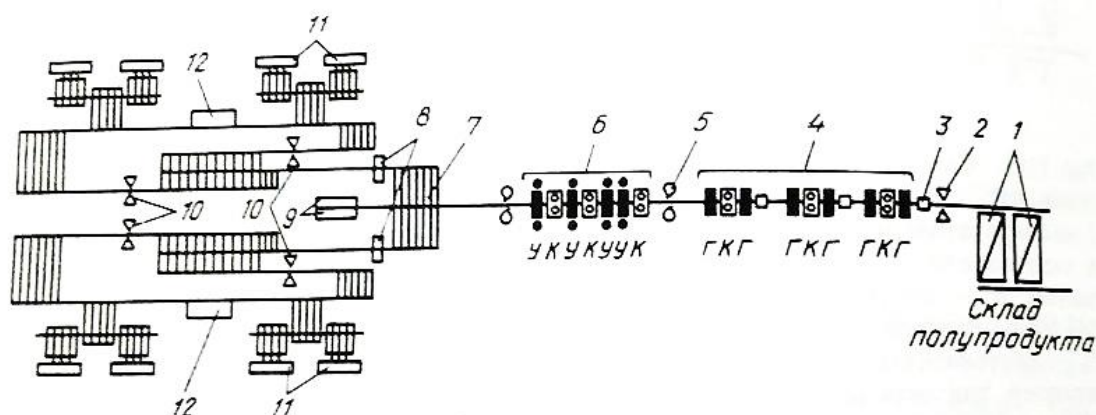


Рисунок 6 – Схема расположения оборудования непрерывного [9] среднесортного стана 450:

- 1 – нагревательные печи; 2 – ножницы горячей резки;  
 3 – кантователь; 4 – черновая группа клеток; 5 – летучие ножницы; 6 – чистовая группа клеток; 7 – холодильник; 8 – правильные машины; 9 – карманы; 10 – ножницы холодной резки 11 – вязальные машины; 12 – карманы для готового профиля; К – комбинированные клетки; У – универсальные клетки; Г – горизонтальные клетки

Комбинированные клетки в зависимости от прокатываемого профиля могут работать в режиме горизонтальной или вертикальной клетки. Чистовая непрерывная группа состоит из семи клеток 530, в том числе трех комбинированных и четырех горизонтальных. При прокатке балок и швеллеров с параллельными полками горизонтальные клетки заменяются универсальными 900/600. Все клетки стана выполнены жесткой конструкции бесстанинного типа, что позволило уменьшить их габариты и положительно повлиять на компоновку стана в целом.

Привод клетей индивидуальный постоянного тока мощностью по 2000 кВт. Такая компоновка клетей позволяет катать все профили без кантовки.

В состав стана входят две нагревательные печи, оснащенные механизмами безударной выдачи заготовок.

Так как в литой стали образуется сетка эвтектики, которая ухудшает свойства стали. При горячей деформации слитка эта сетка постепенно раздробляется. Карбидные частицы сначала вытягиваются вдоль направления деформирования, создавая карбидную полосчатость, а при дальнейших обжатиях они более равномерно распределяются в структуре. На рисунке 7 показана карбидная неоднородность быстрорежущей стали Р6М5 × 100.

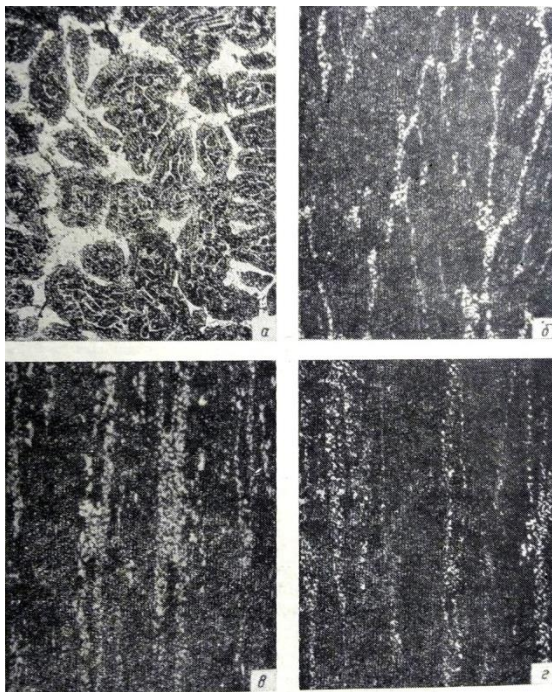


Рисунок 7 – Карбидная неоднородность быстрорежущей стали Р6М5 × 100[1]

а – литая структура(сетка эвтектики скелетообразной формы); б – мало деформированная сталь (разорванная сетка); в – сильно деформированная сталь (резко выраженная полосчатость); г – значительно деформированная сталь (полосчатость)

## 1.9 Технологический процесс термообработки стали Р6М5

Термическая обработка быстрорежущих сталей включает смягчающий отжиг проката или поковок перед изготовлением инструмента и окончательную термическую обработку – закалку с отпуском готового инструмента. Схема термической обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 приведена на рисунке 8.

Предварительная термическая обработка.

Сортовой прокат из быстрорежущей стали подвергаются изотермическому отжигу, который является предварительной термической обработкой. Целью отжига является: понижение твердости до НВ ~ 250...300 единиц и подготовка структуры для закалки и предупреждение возникновения нафталинистого излома.

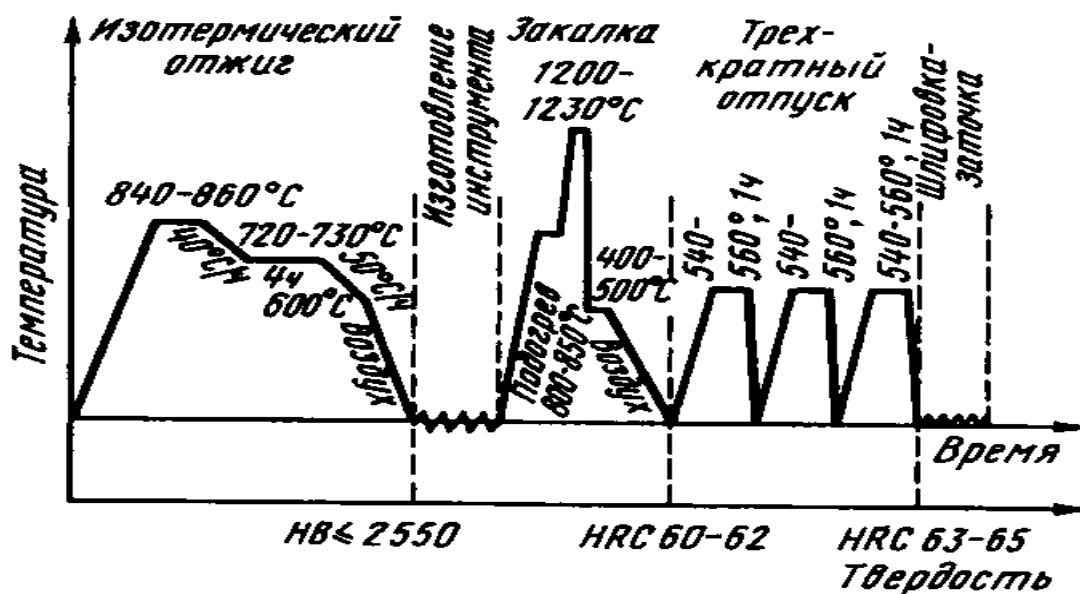


Рисунок 8 – Схема термической обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5[11]

Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу и имеют в литом состоянии эвтектику скелетообразного вида. Перед горячей механической обработкой ставится задача раздробления хрупких карбидов, на отдельные зерна, в связи с чем слитки подвергают 2 – 3 кратному обжатию. Послековки и отжига в структуре стали имеются зернистые карбиды с крупными первичными эвтектическими карбидами и более мелкими вторичными.

Отжиг быстрорежущей стали ведется на зернистый перлит с нагревом до температур  $A_{c1} + (40 - 60)^\circ\text{C}$ , и для стали P6M5 нагрев осуществляют до  $840...860^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением по  $30...40^\circ/\text{ч}$  до  $72...750^\circ\text{C}$ , выдержка не менее 4 ч, охлаждение со скоростью  $40...50^\circ/\text{ч}$  до  $600^\circ\text{C}$  и далее на воздухе; при таком отжиге сталь получает твердость не более 255 НВ [11].

Зернистый перлит по сравнению с пластинчатым обладает меньшей твердостью, большей пластичностью и вязкостью, что обеспечивает во многих случаях лучшую обрабатываемость резанием и штампуемость.

Для высокоуглеродистых инструментальных сталей структура зернистого перлита наиболее благоприятна при проведении закалки. При аустенитизации карбидные частицы глобулярной формы растворяются медленней, чем пластинчатые, и в большой мере задерживают рост зерна. Поэтому стали со структурой зернистого перлита имеют широкий допустимый интервал закалочных температур, чем при исходной структуре пластинчатого перлита. В процессе осуществления закалки изделия со структурой зернистого перлита менее склонны к образованию трещин. После закалки и низкого отпуска они характеризуются более благоприятным сочетанием прочности и вязкости, более высокой износостойкостью, что связано с равномерным распределением в мартенсите глобулярных карбидов, не растворившихся в аустенитизации [12].

Заэвтектоидные стали в целях получения зернистого перлита часто подвергают изотермическому отжигу. Изотермический отжиг имеет меньшую длительность, зернистый перлит получается более однородным, а также уменьшается опасность образования карбидной сетки. В результате выравнивания температуры по объему металла диффузионный распад переохлажденного аустенита протекает при одной степени переохлаждения. Повышения температуры нагрева допускать не следует, так как значительно увеличивается устойчивость переохлажденного аустенита, затягивается процесс отжига, а при длительных выдержках могут образовываться стабильные карбиды  $\text{WC}$ ,  $\text{MoC}$ , которые при дальнейшем нагреве под закалку практически не переходят в раствор. После отжига из отожженной стали изготавливают необходимый инструмент.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Окончательная термическая обработка.

Цель окончательной термической обработки – получить необходимую теплостойкость, износостойкость, твердость и прочность инструмента. Она достигается путем закалки инструмента и последующего отпуска.

Закалка инструмента из быстрорежущей стали чаще всего проводится с аустенитизацией в соляных ваннах. Нагрев под закалку вследствие низкой теплопроводности быстрорежущей стали проводят с предварительным нагревом при температуре 800...850 °С. Оптимальная температура аустенитизации для инструмента из стали Р6М5 равна 1220 °С. Чтобы защитить инструмент от окисления и обезуглероживания, нагрев чаще всего производят в ваннах с расплавленной солью. Выдержка при температуре закалки не должна быть больше, чем это необходимо для растворения карбидных фаз, так как в противном случае наблюдается сильный рост зерна. Охлаждение при закалке чаще всего проводят в селитре с температурой 400...500°С, затем на воздухе, в результате такого охлаждения инструмент имеет меньше термических напряжений и приобретает лучшую стойкость в работе. В результате закалки получается высоколегированный мартенсит. Кроме мартенсита и нерастворившихся при аустенитизации карбидов (около 10%) в структуре закаленной стали Р6М5 присутствует до 20...25% остаточного аустенита .

Отпуск мартенсита следует осуществлять сразу же после закалки во избежание стабилизации аустенита. Оптимальная температура отпуска для стали Р6М5 540...560°С. При этом происходит частичный распад мартенсита, сопровождающийся выделением дисперсных специальных карбидов, в результате чего наблюдается эффект вторичного твердения. В процессе отпуска специальные карбиды выделяются и из остаточного аустенита. Обоеднение остаточного аустенита углеродом и легирующими элементами приводит к повышению его мартенситной точки  $M_n$ . Поэтому при охлаждении до комнатной температуры после окончания отпуска часть остаточного аустенита превращается в мартенсит, то есть имеет место эффект вторичной закалки. Для того чтобы добиться практически полного превращения остаточного аустенита в мартенсит и

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подвергнуть последний отпуску, необходим трехкратный отпуск (рисунок 8). При этом твердость повышается до 63...65 HRC. Кривая зависимости твердости от температуры отпуска представлена на рисунке 9.

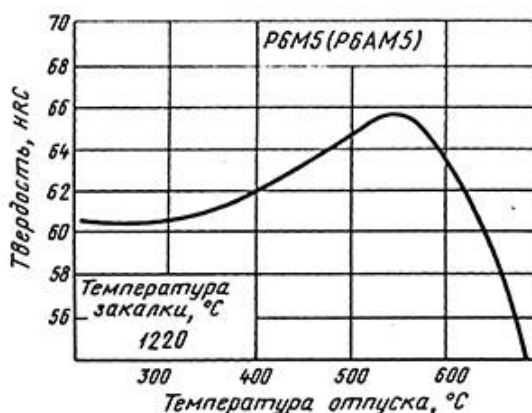


Рисунок 9 – Кривая зависимости твердости от температуры отпуска стали P6M5

После отпуска проводят измерение твердости, затем следует окончательная шлифовка (заточка) инструмента. Для снятия возникших при этом внутренних напряжений инструмент иногда подвергают низкотемпературному отпуску при температуре 200...300°C.

### 1.10 Изотермический отжиг сортового проката из стали P6M5

Режим изотермического отжига сортового проката из стали P6M5 следующий:

- нагрев до 850 °C в течение 5 – 7 часов;
- выдержка 4 часа;
- охлаждение до 750 °C в течение 2 часов;
- выдержка 10 часов при 750°C
- охлаждение со скоростью 20°C/час до 600°C и далее на воздухе.

После отжига твердость стали должна быть не более 225 НВ.

Режим термообработки сортового проката быстрорежущей стали Р6М5 приведен на рисунке 10.

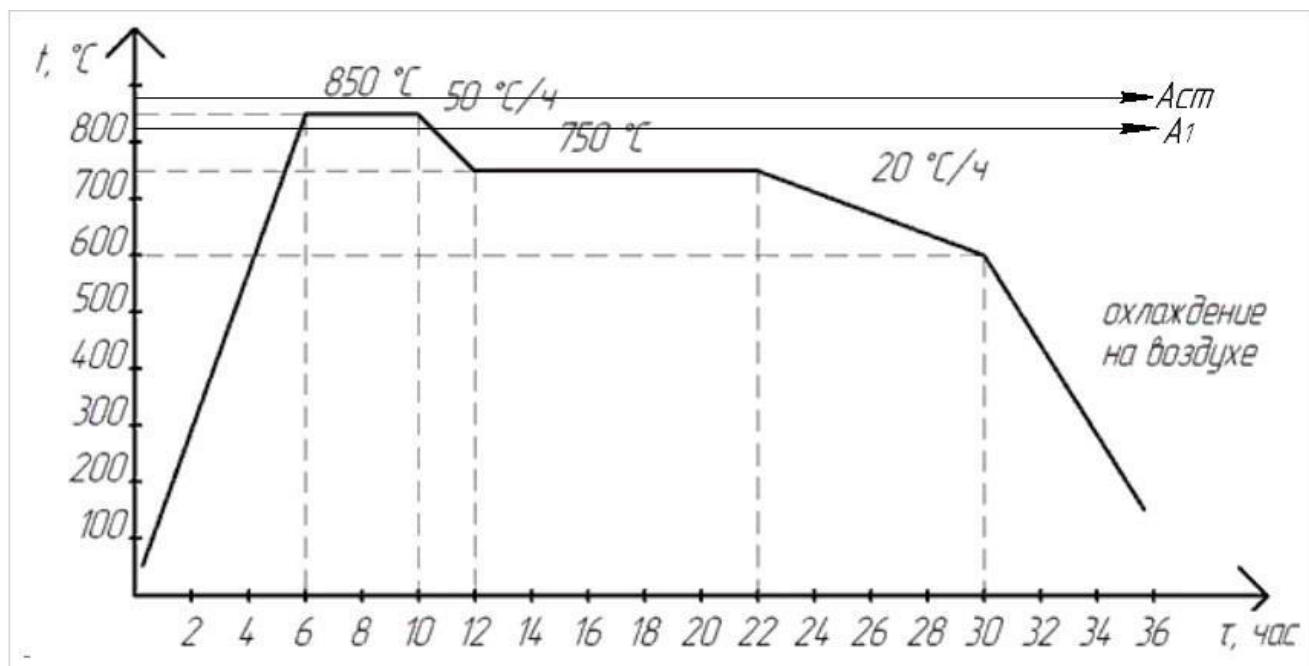


Рисунок 10 – Режим термообработки сортового проката из быстрорежущей стали Р6М5

После термической обработки металл передается на участок отделки. Там он подвергается правке на правильных машинах. Перед правкой температура стали должна быть от 250 до 300°С. Правка прутков производится строго по пакетно. Затем прутки подвергаются светлению, то есть удалению с поверхности прутков или заготовок окалины. Светление осуществляется для определения состояния поверхности, скрытой под окалиной. Оно производится кольцами. Шаг светления не должен превышать 200 мм, а ширина кольца должна быть не менее 20 мм.

### 1.11 Контроль качества после термической обработки

Контроль качества продукции производится в соответствии с ГОСТ 19265 – 76 . После отжига проводят: контроль твердости, контроль глубины обезуглероженного слоя, контроль микроструктуры, контроль продольного закаленного излома.

Контроль твердости. Контролируется твердость в состоянии поставки и твердость после закалки. Для контроля твердости стали в состоянии поставки для металлопродукции диаметром или толщиной до 30 мм отбирают два прутка от 1 т., но не менее восьми прутков от партии; для металлопродукции диаметром или толщиной свыше 30 мм – 15% прутков от партии, но не менее пяти штук от партии. Для контроля твердости после закалки отбирают две пробы для профиля свыше 40 мм. Твердость после отжига должна быть не более 225 НВ. Твердость металла после закалки 1220°С с отпуском 560°С должна быть HRC = 63 – 65 ед.

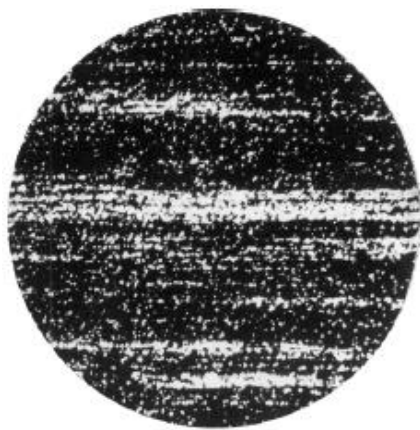
Контроль глубины обезуглероженного слоя. Для этого контроля берут две пробы для профиля до 100 мм включительно. Глубина обезуглероженного слоя горячекатаной, кованой и калиброванной сталей не должна превышать на сторону: 0,3 мм плюс 2 % от диаметра или толщины – для диаметров или толщин до 20 мм; 0,5 мм плюс 1 % от диаметра или толщины – для диаметров или толщин свыше 20 мм. На прутках со специальной отделкой поверхности обезуглероженный слой не допускается.

Контроль микроструктуры. Для контроля микроструктуры используют две пробы для профиля свыше 40 мм. При этом производят контроль карбидной неоднородности и величины аустенитного зерна.

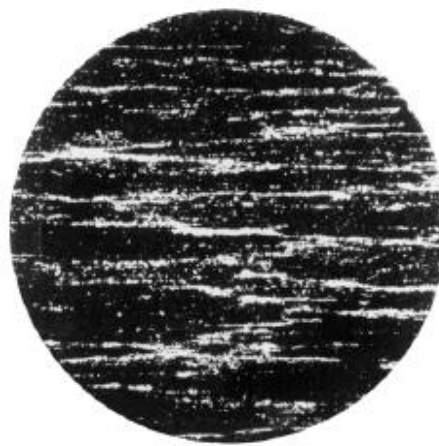
Карбидная неоднородность проверяется после закалки и отпуска на пробах, отобранных для этого вида контроля. И она не должна превышать 4 балла (рисунок 11) при диаметре прутка 40 – 60 мм.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		





а)



б)

Рисунок 11 – Карбидная неоднородность – 6 балл

а) полосчатая структура, единичные или множественные полосы (карбиды внутри полос раздробленные);

б) остатки разорванной карбидной сетки (сетка с раздробленными карбидами)

После термообработки образцы затачивают на шлифовальном станке на глубину от 1,0 до 1,5 мм, а затем шлифуют и полируют. Для выявления карбидной неоднородности отполированные шлифы подвергают сильному травлению в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте с таким расчетом, чтобы получить на темном фоне протравленной структуры белые частички карбидов. Карбидная неоднородность оценивается по наихудшему месту шлифа. Балл карбидной неоднородности быстрорежущей стали устанавливается как среднеарифметическое из пяти худших полей зрения.

В прутках со специальной отделкой поверхности скопления «угловатых» карбидов не допускается. Допускаются единичные «угловатые» карбиды, встречающиеся в отдельных полях зрения.

Для контроля величины аустенитного зерна берут две пробы. Величина аустенитного зерна стали после закалки должна соответствовать 9 – 10 баллам по стандартной шкале.

Контроль продольного закаленного излома. Для контроля продольного закаленного излома используют не менее одной пробы от садки. Полученные изломы просматривают невооруженным глазом или с помощью лупы. Визуально проверяют отсутствие нафталенистого излома.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 1.12 Анализ возможного брака и способы устранения

К основным дефектам, которые могут возникать при изотермическом отжиге сортового проката из быстрорежущих сталей, относятся: обезуглероживание, неудовлетворительная твердость, коробление, нафталинистый излом.

Обезуглероживание стали. Прутки, имеющие повышенную глубину обезуглероженного слоя, обычно подвергают шлифовке на меньший диаметр.

Неудовлетворительная твердость. Причиной этого может быть несоблюдение технологического процесса (например, недостаточная выдержка, пониженная температура отжига). Для исправления этого вида брака необходимо провести повторный отжиг.

Коробление. Этот вид брака наблюдается при нагреве длинномерного сортового проката малого диаметра. Он устраняется правкой металла на сортоправильных машинах.

Нафталинистый излом. Это излом со своеобразными блестками, по количеству больше и крупнее в середине инструмента – свидетельствует о следующих дефектах структуры стали: сталь имеет крупное зерно, во много раз превосходящее зерно правильно обработанной стали. Твердость и теплостойкость сталей с нафталинистым и нормальным изломом не отличаются, но инструмент с таким изломом имеет пониженную работоспособность, в основном, из-за меньшей в 2...4 раза вязкости стали.

Причиной возникновения нафталинистого излома может быть окончание горячей механической обработки при излишне высокой температуре, если деформация не превышает 40%, и если последующий отжиг выполнен недостаточно полно; зерно тем крупнее, чем выше температура окончания обработки;

Устранить нафталинистый излом сложно, но можно многократным и длительным отжигом.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

### 1.13 Сравнение выбранного материала с зарубежными аналогами

Сталь Р6М5 имеет аналоги в Германии, Японии, Франции, Китае.

Химический состав этих сталей приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав рассматриваемых сталей

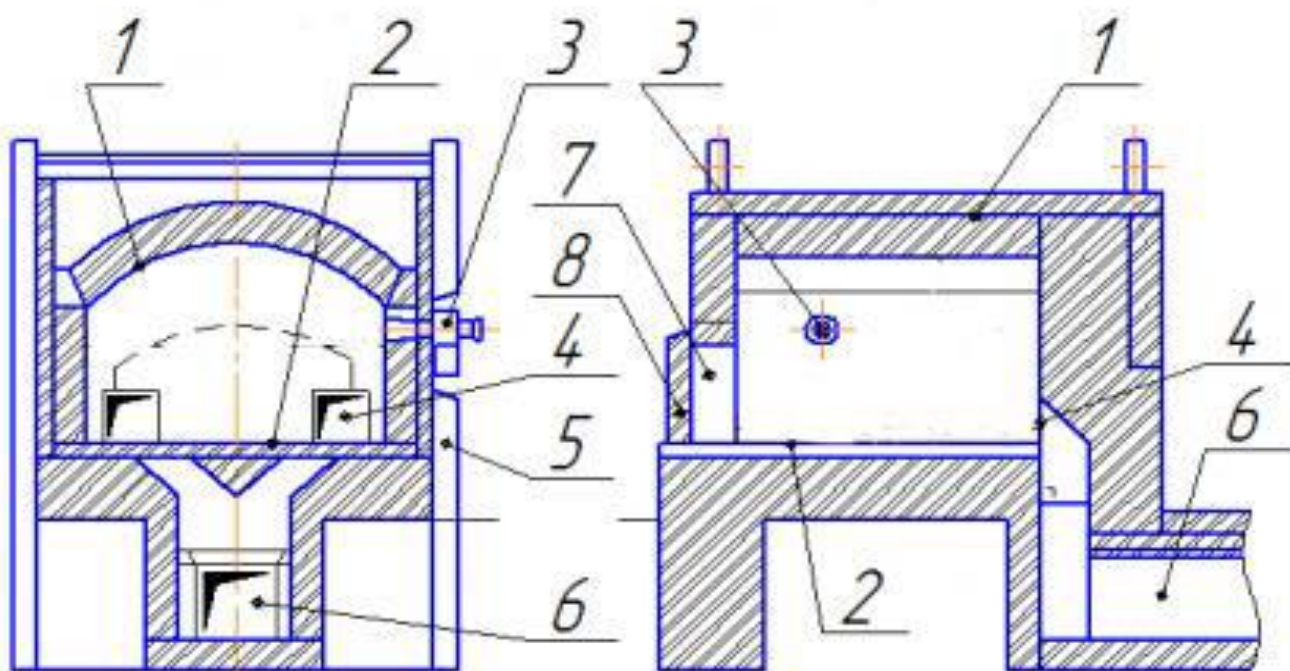
Марка стали	Содержание элементов, мас. %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	W
HS6-5-2 (Франция)	0,86– 0,94	≤ 0,45	≤ 0,40	до 0,030	до 0,030	3,80– 4,50	4,70– 5,2	1,7– 2,0	6,0– 6,7
SKH51 (Япония)	0,8–0,82	≤ 0,45	≤ 0,40	до 0,030	до 0,030	3,80– 4,50	4,70– 5,2	1,70– 2,10	5,9– 6,7
W 6 Mo 5 Cr 4 V 2 (Китай)	0,8–0,9	0,2– 0,45	0,15– 0,4	до 0,030	до 0,030	3,8– 4,40	4,5– 5,5	1,75– 2,2	5,5– 6,75
Р6М5 (Россия)	0,82–0,9	0,20– 0,50	0,2–0,5	до 0,025	до 0,030	3,8– 4,40	4,8– 5,3	1,7– 2,10	5,5– 6,5

Как видно из таблицы, зарубежные аналоги стали Р6М5 практически не отличаются.

## 2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 2.1 Выбор оборудования

На основании принятого режима термической обработки сортового проката из стали Р6М5 её наиболее выгодно в технологическом и экономическом плане проводить в камерных печах. Камерные печи широко применяются для различных видов термической обработки металла как при единичном так и серийном производстве. В последнее время широко применяются универсальные автоматизированные камерные печи со встроенными механизмами для транспортирования изделий. Способ загрузки металла в данные камерные печи – механизированный, с помощью напольной загрузочной машины грузоподъёмностью до 50 т. Это позволяет загружать и выгружать всю садку сразу, что не снижает производительности, а также уменьшаются потери тепла.



- 1 – свод печи                      3 – горелка                      5 – каркас                      7 – загрузочное окно  
2 – под печи                      4 – выход газов                      6 – дымоход                      8 – заслонка

Рисунок 12 – Эскиз камерной печи с внешней механизацией

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ

## 2.2 Общая характеристика конструкции камерной печи

Камерные печи в большинстве случаев имеют простую конструкцию и являются универсальными термическими печами. Камерные печи с внешней механизацией служат для термической обработки сортового проката с целью снятия внутренних напряжений, снижении твердости, прочности или получение зернистого перлита.

Характеристики печи:

### 1. Размеры рабочего пространства печи:

- длина 10324 мм;
- ширина 3016 мм;
- высота 1980 мм;
- площадь пода 30 м<sup>2</sup>.

### 2. Максимальная масса садки – 45 т.

3. Способ загрузки – механизированный, с помощью напольной загрузочной машины грузоподъемностью до 50 т.

### 4. Топливо-природный газ

5. Тип горелок-труба в трубе с принудительной подачей воздуха от вентилятора.

Количество горелок на одну печь – 13 шт., расположены с одной стороны печи.

### 6. Количество регулируемых зон по длине печи – 3:

первая зона – 4 горелки, вторая зона – 5 горелок, третья зона – 4 горелки.

### 7. Температура нагрева металла – до 950 °С.

Футеровка печи выполняется двухслойной. Стены изнутри футерованы шамотом легковесом (1,0), наружный слой (изоляция) выполнен из диатомитового кирпича Д-500. Свод печи изнутри футерован шамотом класса Б, изоляция диатомитовый кирпич Д-500. Кладка печи заключена в кожух – стальной каркас, который возводится на фундаменте.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Свод печи – арочный. Толщина свода 370 мм, при этом слой футеровки составляет 300 мм. Подина имеет два прямоугольных паза, в которые уложены два корытообразных желоба и закрыты плитным настилом толщиной 70 мм. Материал настила – сталь Х23Н13.

По тепловому режиму печь разбита на три тепловые зоны, в каждой зоне находится контрольная термопара. Регулирующая термопара установлена во второй зоне печи.

Подподовые топки, которыми оборудована печь, сообщаются с рабочим пространством печи через огневые рециркуляционные каналы, расположенные вдоль боковых стен печи. Воздух для горения подается вентилятором ВВД-9. Образующиеся при сжигании топлива дымовые газы проходят под подом и поступают в рабочее пространство печи через правый канал. При этом в топке развиваются высокие температуры, необходимые для сгорания топлива, и одновременно рабочее пространство ограждено от воздействия излучающего высокотемпературного факела. Через левый канал в подподовую топку подсасываются более холодные дымовые газы из рабочего пространства. В результате этого снижается до требуемой величины температура вновь образующихся при горении дымовых газов перед их входом в рабочее пространство и обеспечивающих их циркуляцию. Ряд подподовых топок выполняется по длине с шахматным расположением горелок. При таком расположении горелок в рабочем пространстве печи достигается развитие циркулирующих газов и обеспечивается тем самым равномерный нагрев металла. Для удаления дымовых газов из рабочего пространства печи в стенах выполнены специальные каналы, расположенные над уровнем пода печи, что обеспечивает удовлетворительный нагрев низа садки. Далее дымовые газы поступают в систему подземных бортов и в дымовую трубу.

Сортовой прокат загружается в печь напольно-загрузочной машиной. Металл при этом размещают в бугелях.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 2.3 Расчет горения топлива

Произведем расчет горения природного газа имеющего следующий состав:

Таблица 6 – Состав сухого газа

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
95,5%	2,3%	0,4%	0,03%	0,01%	0,5%	1,26%

Влажность газа  $W=23\text{г/м}^3$ . Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,1$ .

Определим состав рабочего топлива:

$$X_p = X_c \cdot \frac{100}{100 + 0,1242W} \quad (2)$$

где  $X_p$  – содержание компонентов в рабочем топливе;

$X_c$  – содержание компонентов в сухом топливе.

Рассчитаем состав рабочего газа для каждого компонента:

$$X_p = X_c \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 23} \quad (3)$$

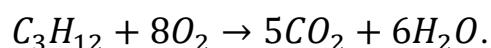
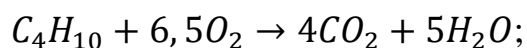
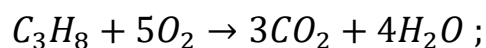
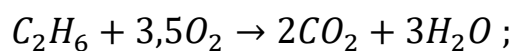
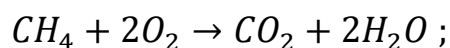
Занесем полученные результаты в таблицу 7.

Таблица 7 – Состав влажного газа

Природный газ	Состав, %							
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Сухой	95,5	2,3	0,4	0,03	0,01	0,5	1,26	-
Рабочий	92,83	2,236	0,389	0,029	0,0097	0,486	1,225	3,233

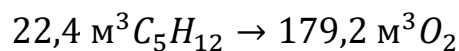
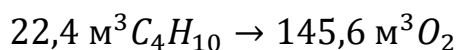
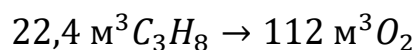
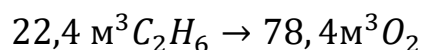
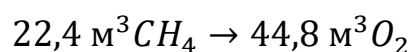
22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ

Составим стехиометрические реакции горения горючих компонентов топлива:



Из реакций видно, что для сжигания 1 моля  $CH_4$  требуется 2 моля  $O_2$ ;  
соответственно 1 моль  $C_2H_6$  – 3,5 моля  $O_2$ ; 1 моль  $C_3H_8$  – 5 моля  $O_2$ ; 1 моль  $C_4H_{10}$  –  
6,5 моля  $O_2$ ; 1 моль -  $C_5H_{12}$  – 8 моля  $O_2$ .

Так как 1 кмоль любого газа занимает один и тот же объем, равный  $22,4 \text{ м}^3$ ,  
для полного сжигания компонентов требуется:



В  $100 \text{ м}^3$  природного газа рассматриваемого состава содержится (таблица 8)

Таблица 8 – Состав рассматриваемого природного газа в  $100 \text{ м}^3$

$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	$C_5H_{12}$	$CO_2$	$N_2$
95,5%	2,3%	0,4%	0,03%	0,01%	0,5%	1,26%



Для сжигания этих компонентов соответственно требуется:

$$CH_4 \rightarrow 95,5 \cdot 2 = 191 \text{ м}^3;$$

$$C_2H_6 \rightarrow 2,3 \cdot 3,5 = 8,05 \text{ м}^3;$$

$$C_3H_8 \rightarrow 0,4 \cdot 5 = 2 \text{ м}^3;$$

$$C_4H_{10} \rightarrow 0,03 \cdot 6,5 = 0,195 \text{ м}^3;$$

$$C_5H_{12} \rightarrow 0,01 \cdot 3,5 = 0,035 \text{ м}^3.$$

Итого 201,28 м<sup>3</sup> кислорода.

Сжигание происходит в сухом воздухе, доля кислорода по объему составляет 21%, а остальные 79% приходятся на азот. Таким образом количества азота в воздухе  $79/21=3,762$  раза больше количества кислорода. Поэтому расход воздуха для сжигания 100<sup>3</sup> газа будет равен:

$$V_B = 201,28 + 201,28 \cdot 3,762 = 958,5 \text{ м}^3 \quad (4)$$

Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,1$ .

Определение количества и состава продуктов сгорания.

При расчете горения необходимо составить материальный баланс, определяя массы исходных веществ и образующихся продуктов сгорания.

Расчет процесса горения ведут на 100 м<sup>3</sup> газообразного топлива. Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания природного газа приведены в таблице 9.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 9 – Расход воздуха, состава и количества продуктов сгорания природного газа в воздухе

Состав топлива		Требуется воздуха, м <sup>3</sup>			Продукты сгорания, м <sup>3</sup>					
компонент	%, м <sup>3</sup>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	∑	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	∑	
CH <sub>4</sub>	95,5	191	201,28·3,762=757,215		95,5	191	-	757,215	-	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,3	8,05			4,6	6,9	-		-	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,4	2			1,2	1,6	-		-	
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,03	0,195			0,12	0,15	-		-	
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,01	0,035			0,05	0,06	-		-	
CO <sub>2</sub>	0,5	-			0,5	-	-		-	
N <sub>2</sub>	1,26	-			-	-	-		1,26	-
$\alpha = 1,0$										
∑		201,28	757,215	958,495	101,97	199,71	-	758,475	1060,155	
%		20,9996	79,0004	100	9,62	18,84		71,54	100	
$\alpha = 1,1$										
∑		221,408	832,94	1051,89	101,97	199,71	30,17	834,32	1166,17	
%		20,9996	79,0004	100	8,74	17,13	2,59	71,54	100	

Составим материальный баланс процесса горения при  $\alpha = 1,1$ .

Поступило, кг:

$CH_4$	$95,5 \cdot 16 \text{ кг} = 1528 \text{ кг}$
$C_2H_6$	$2,3 \cdot 30 \text{ кг} = 69 \text{ кг}$
$C_3H_8$	$0,4 \cdot 44 \text{ кг} = 17,6 \text{ кг}$
$C_4H_{10}$	$0,03 \cdot 58 \text{ кг} = 1,74 \text{ кг}$
$C_5H_{12}$	$0,01 \cdot 72 \text{ кг} = 0,72 \text{ кг}$
$CO_2$	$0,5 \cdot 44 \text{ кг} = 22 \text{ кг}$
$O_2$	$201,28 \cdot 32 \text{ кг} = 6440,96 \text{ кг}$
$N_2$ из воздуха	$757,215 \cdot 28 \text{ кг} = 21202,02 \text{ кг}$
$N_2$ из газа	$1,26 \cdot 28 \text{ кг} = 35,28 \text{ кг}$

Итого: 29330,32

Получено, кг:

$CO_2$	$(0,5 + 101,97) \cdot 44 \text{ кг} = 4508,68 \text{ кг}$
$H_2O$	$199,71 \cdot 18 \text{ кг} = 3594,78 \text{ кг}$
$N_2$ из воздуха	$757,215 \cdot 28 \text{ кг} = 21202,02 \text{ кг}$
$N_2$ из газа	$1,26 \cdot 28 \text{ кг} = 35,28 \text{ кг}$

Итого : 29340,76

Определение температуры горения

Расчитаем низшую теплоту сгорания топлива

$$Q_H^P = \frac{\sum_i Q_i \cdot x_i}{22,4}, \quad (5)$$

где  $Q_i$  – тепловой эффект реакции горения соединения;

$x_i$  – доля составляющей в газе.

$$Q_H^P = \frac{(805560 \cdot 0,955 + 1323580 \cdot 0,023 + 2044156 \cdot 0,004 + 2648745 \cdot 0,0051)}{22,4}$$
$$= 36671,31 \text{ кДж/м}^2$$

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

Найдем энтальпию продуктов сгорания.

Для определения каллометрической температуры горения необходимо найти начальную энтальпию (теплосодержание) 1 м<sup>3</sup> продуктов сгорания:

$$i = i_O + i_B, \quad (6)$$

где  $i_O, i_B$ , – соответственно количества тепла, получаемые от сжигания топлива и вносимые подогретым воздухом.

Из таблицы 4 следует, что при выбранной величине коэффициента избытка воздуха, равной 1,1 количества продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 100 м<sup>3</sup> топлива, составит 1166,17 м<sup>3</sup> или с некоторыми округлением 11,66 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> топлива. Воздуха при этом будет затрачено 1051,89 м<sup>3</sup> на 100 м<sup>3</sup> топлива, или 10,52 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> топлива.

Таким образом, количества тепла, получаемое от сжигания топлива, в расчете на единицу объема продуктов сгорания ( $V_{\text{пр. сг.}}$ ), будет равно

$$i_O = \frac{Q_P^H}{V_{\text{пр. сг.}}}, \quad (7)$$

$$i_O = \frac{36671,3}{11,66} = 3145,05 \text{ кДж/м}^3.$$

В базовом варианте пренебрежем количества тепла, вносимым воздухом. Отсюда, энтальпия сгорания будет равна количеству тепла, получаемого от сжигания топлива ( $i = i_O$ ).

$$i_{t1} < i < i_{t2}, t_1 < t_k < t_2$$

$$i_t = f(t)$$

$$i_t = i_t^{CO_2} \cdot \frac{\%CO_2}{100} + i_t^{N_2} \cdot \frac{\%N_2}{100} + i_t^{O_2} \cdot \frac{\%O_2}{100} + i_t^{H_2O} \cdot \frac{\%H_2O}{100}, \quad (8)$$

Зададимся возможной температурой продуктов горения 1900°С:

$$i_{1900} = 4634,76 \cdot 0,0874 + 3657,85 \cdot 0,1713 + 2971,30 \cdot 0,0259 + 2808,22 \cdot 0,7154 \\ = 3117,64 \text{ кДж/м}^2$$

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Так как значение  $i > i_{1900}$  зададимся температурой продуктов горения  $2000^{\circ}\text{C}$ ;

$$i_{2000} = 4910,51 \cdot 0,0874 + 3889,72 \cdot 0,1713 + 3142,76 \cdot 0,0259 + 2970,25 \cdot 0,7154$$

$$= 3301,787 \text{ кДж/м}^2$$

Поскольку  $i_{2000} > i_0$ , то действительная калориметрическая температура лежит в пределах  $1900 \dots 2000^{\circ}\text{C}$  и может быть найдена интерполяцией:

$$t_K = 1900 + \frac{3145,05 - 3117,64}{3301,787 - 3117,64} = 1900,15^{\circ}\text{C}$$

Определим действительную температуру горения топлива по формуле:

$$t_D = \eta_{\text{пир}} \cdot t_K, \quad (9)$$

где  $\eta_{\text{пир}}$  – пирометрический коэффициент, для камерной печи  $\eta_{\text{пир}} = 0,8 \dots 0,85$ ;

$t_K$  – калориметрическая температура горения,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$t_D = 0,8 \cdot 1900,15 = 1520,12^{\circ}\text{C}$$

Рассчитаем действительную температуру горения для проектного варианта

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2.4 Расчет времени нагрева заготовки из стали Р6М5

Проводится расчет времени нагрева сортового проката из стали Р6М5, которая подвергается изотермическому отжигу в камерной печи с внешней механизацией.

Металл, предназначенный для термообработки, загружается в печь садками. Сборка садок производится на специальных стеллажах с использованием бугелей. Диаметр прутка 40 мм и длина 5 м, ширина загружаемой садки 1,2 м, высота 0,92 м, (рисунок 12). Температура нагрева металла 850 °С, температура печи 880 °С.

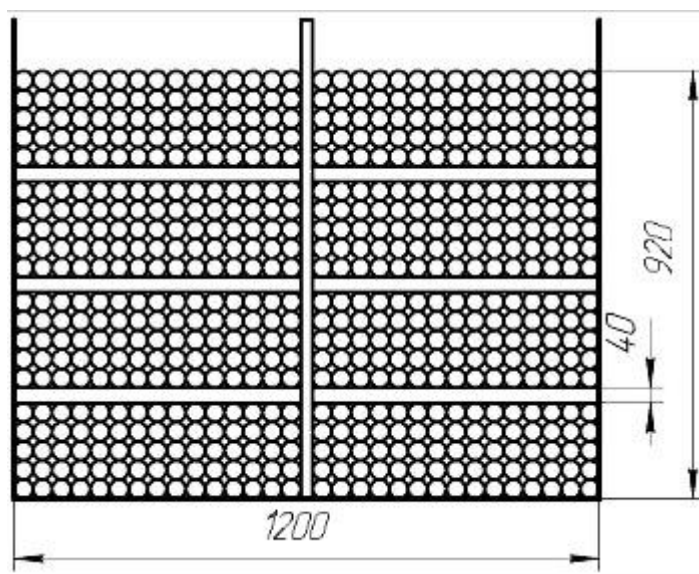


Рисунок 12 – Схема сборки сортового проката из быстрорежущей стали

Металл загружается в печь с зажженными горелками. Температура печи при посадке сортового проката разрешается не выше 700 °С, но не выше температуры выдержки 750 °С.

После загрузки холодного изделия в печь начинается 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:

За условную границу между «тонкими» и «массивными» изделиями принимают такое сечение, для которого число Био равно 0.25. Если  $Bi < 0.25$  расчеты выполняются по формулам для тонких изделий, если  $Bi > 0.25$  - по методике, принятой для массивных изделий [13].

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda_{эф}}; \quad (10)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

$S$  - характерный геометрический размер изделия, м.

1) В соответствии с рекомендуемым режимом термической обработки и критическими температурами принимаем:

Температура нагрева металла  $t_{нагр} = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

Температура в печном пространстве должна быть несколько выше, чтобы обеспечить такой нагрев  $t_{печи} = 880 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

Зная температуру нагрева металла  $t_n=850 \text{ } ^\circ\text{C}$  определим эффективную теплопроводность пакета стальных прутков [13].

$\lambda_{эф} = 8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;

Дымовые газы, заполняющие рабочее пространство топливной печи, передают тепло лучеиспусканием и конвекцией нагреваемым изделиям и стенкам печи. Стенки печи излучают тепло на изделия. Все эти процессы учитываются при определении коэффициента теплоотдачи [13].

Вычислим коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием

$$\alpha_{л} = C_0 \cdot K \cdot \varepsilon_M \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{мсп}}{100} \right)^4 \right]}{(T_{п} - T_{мсп})}; \quad (11)$$

где  $T_{п}$  – температура в печном пространстве, К;

$T_{мсп}$  – средняя температура металла, К.

$K$  – коэффициент, учитывающий взаимные процессы лучеиспускания дымовых газов, изделия и стенок печи.

Коэффициент  $K$  выражается формулой:

$$K = \frac{(1 - \varepsilon_r) + \omega}{[\varepsilon_M + \varepsilon_r(1 - \varepsilon_M)] \cdot \frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \omega}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_M$  – степень черноты нагреваемого металла;

$\omega$  – степень развития кладки, её значение приблизительно равно соотношению:

$$\omega = \frac{F_{\Pi}}{F_M}, \quad (13)$$

где  $F_{\Pi}$  – суммарная внутренняя поверхность свода и стенок;

$F_M$  – воспринимающая тепловое излучение поверхности металла.

Рассчитаем количество прутков в садке:

$$N = \frac{1000^2}{D^2}, \quad (14)$$

где  $D$  – диаметр прутка

$$N = \frac{1000^2}{40^2} = 625 \text{ прутков} \quad (15)$$

$$F_{\Pi} = 2HB + 2HL + BL \quad (16)$$

$$F_{\Pi} = 2 \cdot 1,98 \cdot 10,324 + 2 \cdot 3,016 \cdot 1,98 + 3,13 \cdot 10,324 = 85,19 \text{ м}^2$$

$$F_M = 2hl + 2bh + bl, \quad (17)$$

$$F_M = 2 \cdot 0,92 \cdot 5 + 2 \cdot 1,2 \cdot 0,92 + 1,2 \cdot 5 = 17,408 \text{ м}^2$$

$$\omega = \frac{85,19}{17,408} = 4,89$$

Степень черноты дымовых газов зависит от их состава. В состав дымовых газов в основном входят азот, углекислый газ и водяной пар.

Одно- и двухатомные газы имеют ничтожно малую интенсивность теплового излучения. Поэтому степень черноты дымовых газов определяется выражением:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_{CO_2}$  – степень черноты углекислого газа;

$\varepsilon_{H_2O}$  – условная степень черноты водяного пара;

$\beta$  – поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара.



Степень черноты газа зависит от его температуры, парциального давления и средней эффективной длиной лучей  $S_{эф}$ . Величину  $S_{эф}$  приблизительно можно определить по формуле:

$$S_{эф} = 0,9 \cdot \frac{4V}{F}, \quad (19)$$

где  $V$  – объем, заполненный излучающим газом,  $m^3$

$F$  – площадь стенок, ограничивающих этот объем,  $m^2$

$$V = V_n - V_M, \quad (20)$$

$$V = 3,016 \cdot 1,98 \cdot 10,324 - 1,2 \cdot 0,92 \cdot 5 = 56,13 \text{ м}^3$$

$$F = F_M + F_{II}, \quad (21)$$

$$F = 85,19 + 17,41 = 102,6 \text{ м}^2.$$

$$S_{эф} = 0,9 \cdot \frac{4 \cdot 56,13}{102,6} = 1,97 \text{ м}.$$

Для определения  $\varepsilon_{CO_2}$  и  $\varepsilon_{H_2O}$  коэффициента  $\beta$  применяются из номограммы

$$p_{CO_2} \cdot S_{эф} = 8,71 \cdot 1,97 = 17,16 \rightarrow \varepsilon_{CO_2} = 0,15$$

$$p_{H_2O} \cdot S_{эф} = 17,58 \cdot 1,97 = 34,63 \rightarrow \varepsilon_{H_2O} = 0,27$$

$$\beta = 1,1$$

Степень черноты дымовых газов определяем по формуле (18)

$$\varepsilon_T = 0,15 + 1,1 \cdot 0,27 = 0,447.$$

Коэффициент  $K$  рассчитываем по формуле (12)

$$K = \frac{(1 - 0,447) + 4,89}{[0,8 + 0,447(1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,447}{0,447} + 4,89} = 0,91$$

Средняя температура нагреваемого металла равна:

$$T_{мсп} = \frac{1}{3} \cdot (T_{мн} + 2T_{мк}) + 273; \quad (22)$$

где  $T_{мн}$ ,  $T_{мк}$  – начальная и конечная температура садки,  $^{\circ}C$

$$T_{мсп} = \frac{1}{3} \cdot (20 + 2 \cdot 850) + 273 = 846,3 \text{ К}$$

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием рассчитывается по формуле (11):

$$\alpha_{\text{л}} = 5,67 \cdot 0,91 \cdot 0,8 \cdot \frac{\left[\left(\frac{1153}{100}\right)^4 - \left(\frac{846}{100}\right)^4\right]}{(1153 - 846)} = 168,84 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Учитывая сложность теплового процесса на поверхности нагреваемого изделия, коэффициент теплоотдачи считают сложной величиной, которая равна сумме коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием  $\alpha_{\text{л}}$  и конвекцией  $\alpha_{\text{к}}$ :

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}. \quad (23)$$

Для среднетемпературных печей не имеющих принудительной циркуляции печной атмосферы, коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{\text{к}}$  приближенно может быть принят  $10 \dots 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$$\alpha = 168,84 + 10 = 178,84 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Зная коэффициент теплоотдачи, определяющий размер и теплофизические характеристики металла вычислим критерий Био

Геометрический размер изделия:  $S = d/2 = 0,1$ , м

$$Bi = \frac{178,84 \cdot 0,1}{8} = 2,24 > 0,25$$

Следовательно, нагреваемое изделие теплотехнически «массивное». Значит, учитываем перепад температур по сечению нагреваемой заготовки. Определим время нагрева «массивного» изделия в печах периодического действия.

$$\tau_{\text{н}} = \frac{k \cdot F_0 \cdot S^2}{a}, \quad (24)$$

где  $F_0$  – число Фурье;

$a$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$k$  – коэффициент укладки.

$$a = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{c_{\text{пр}} \cdot \gamma}, \quad (25)$$

где  $c_{\text{пр}}$  – средняя теплоемкость,  $0,690 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ;

$\gamma$  – плотность,  $8690 \text{ кг/м}^3$ .

$$a = \frac{8}{690 \cdot 8690} = 1,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определим температурный критерий;

$$\theta = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{п}} - t_0}, \quad (26)$$

$$\theta = \frac{880 - 850}{880 - 20} = 0,035$$

Зная значение коэффициента Био и температурного критерия по графикам Будрина найдем значение  $F_0=2,3$ .

Определим времени нагрева садки:

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{2 \cdot 2,3 \cdot 0,1^2}{1,34 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 9,5 \text{ ч}$$

Определим время нагрева с учетом времени, требуемого для выравнивания температуры:

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{1}{4} \cdot \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{н}}, \quad (27)$$

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{1}{4} \cdot 9,5 + 9,5 = 11,9 \text{ ч}$$

## 2.5 Тепловой расчет камерной печи

Тепловой расчет печи сводится к составлению теплового баланса, который представляет собой уравнение, связывающее приход и расход тепла. Тепловой баланс действующей печи составляют с целью определения технико-экономических показателей ее работы.

Произведем тепловой расчет камерной печи для изотермического отжига сортового проката из быстрорежущей стали Р6М5. Нагрев ведется до температуры 850 °С.

Исходные данные представлены в таблице

Таблица 10 – Исходные данные для расчета

Масса садки, т	34,108
Масса приспособлений, т	1,5
Начальная температура металла/тары, °С	20
Конечная температура нагрева металла/тары, °С	850
Средняя теплоемкость металла приспособления в интервале температур от 20 °С до 850 °С, кДж/(кг · К)	0,695
Средняя теплоемкость металла приспособления в интервале температур от 20 °С до 700 °С, кДж/(кг · К)	0,680
Температура рабочего пространства печи, °С	880
Температура окружающей среды, °С	20
Время, в течение которого открыто загрузочное окно, ч	0,5
Низшая (рабочая) теплота сгорания топлива, кДж/м <sup>3</sup>	36671,31
Площадь поперечного сечения загрузочного окна, м <sup>2</sup>	5,97
Теплоемкость уходящих дымовых газов, кДж/м <sup>3</sup> ·К	1,46

## 2.5.1 Приходные статьи:

### 2.5.1.1 Тепло, получающееся при сжигании топлива:

$$Q_T = Q_H^P \cdot V, \quad (28)$$

где  $Q_H^P$  – низшая (рабочая) теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;

$V$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/с

$$Q_T = 36671,31 \cdot V, \text{ кВт.}$$

## 2.5.2 Расходные статьи:

2.5.2.1 Полезное тепло, расходуемое на нагрев металла, для печей периодического действия по формуле:

$$Q_M = \frac{G}{\tau} \cdot c \cdot (t_{MK} - t_{MH}), \quad (29)$$

где  $G$  – масса изделий, кг;

$\tau_H$  – время нагрева изделий в печи;

$c_M$  – средняя теплоемкость стали Р6М5 в интервале температур от  $t_{MH}$  до  $t_{MK}$ ,

$t_{MH}$  – начальная температура металла,  $t_{MH}=20^\circ\text{C}$ ;

$t_{MK}$  – конечная температура нагрева металла,  $t_{MK}=850^\circ$

Массу садки вычислим по формуле:

$$G = \gamma \cdot V, \quad (30)$$

где  $\gamma$  – плотность металла при 20 °С,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$V$  – объем заготовок, м<sup>3</sup>;

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot l, \quad (31)$$

$$V = 3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 5 = 0,00628 \text{ м}^3,$$

$$G = 8690 \cdot 0,00628 = 54,65 \text{ кг}$$

Общая масса всех 625 прутков будет равна  $G = 34108 \text{ кг}$

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

$$Q_M = \frac{34108}{11,9 \cdot 3600} \cdot 0,695 \cdot 10^3 \cdot (850 - 20) = 459 \text{ кВт.}$$

### 2.5.2.2 Потери тепла на нагрев приспособлений (тары):

$$Q_m = g_m c_m \cdot (t_k - t_n), \quad (32)$$

где  $g_m$  – масса приспособлений, нагреваемая в единицу времени,

$c_m$  – средняя теплоемкость металла приспособления в интервале температур от  $t_n$  до  $t_k$ , Дж/(кг · К)

$t_n$  – температура загружаемого в печь приспособления, °С;

$t_k$  – температура выгружаемого из печи приспособления, °С.

$$Q_m = 0,0417 \cdot 0,680 \cdot (850 - 20) \cdot 10^3 = 23,54 \text{ кВт.}$$

### 2.5.2.3 Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи

Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи можно определить по формуле:

$$Q_{\text{кл}} = 2 \cdot Q_{\text{бок.ст.}} + 2 \cdot Q_{\text{торц.ст.}} + Q_{\text{свод}} + Q_{\text{под}}. \quad (33)$$

Потери тепла в результате теплопроводности через под, свод и стены печи определяются уравнением:

$$Q = \frac{t_n - t_0}{\frac{S_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 F_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n F_n} + \frac{1}{\alpha_v F_{\text{нар}}}}, \text{ Вт} \quad (34)$$

где  $t_n$  – температура рабочего пространства печи,  $t_n=850^\circ\text{C}$ ;

$t_0$  – температура окружающего воздуха,  $t_0=20^\circ\text{C}$ ;

$S_1, S_2, \dots, S_n$  – 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, м<sup>2</sup>·;

$\alpha_v$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки печи в окружающую среду,  $\alpha_v=12\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;

$F_{\text{нар}}$  – наружная поверхность кладки, м<sup>2</sup>.



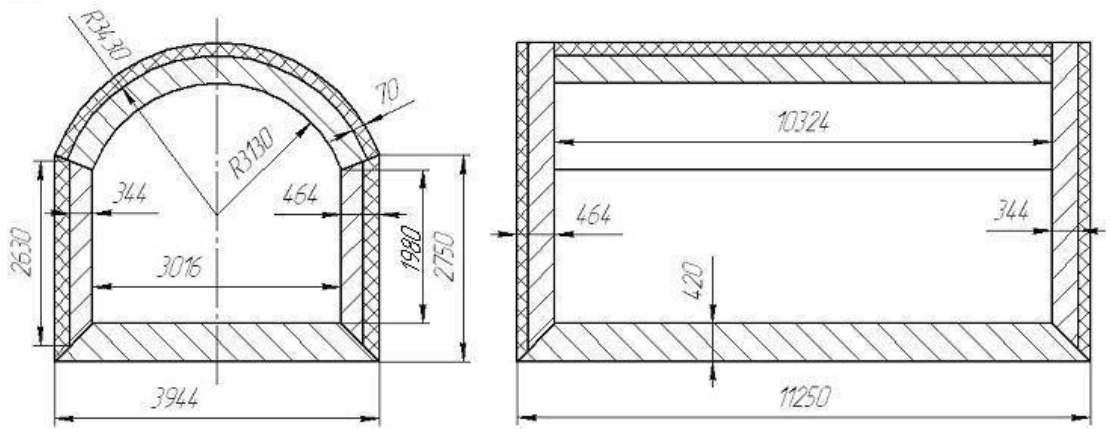


Рисунок 13 – Эскиз футеровки камерной печи

Средние расчетные поверхности слоев кладки рассчитываются по формулам:

$$F_1 = \sqrt{F_{вн} \cdot F_{1,2}}$$

$$F_2 = \sqrt{F_{1,2} \cdot F_{нар}}, \quad (36)$$

где  $F_{вн}$  – внутренняя поверхность кладки,  $m^2$ ;

$F_{1,2}$  – поверхность между первым и вторым слоем кладки,  $m^2$ .

Определим потери тепла через боковую стенку, которая состоит из двух слоев. Эскиз футеровки приведен на рисунке 14.

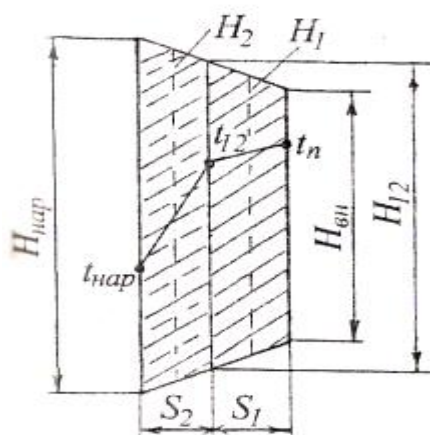


Рисунок 14 - Эскиз боковых стенок печи[13]



Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки боковой стенки:

$$F_{\text{нар}} = 30,94 \text{ м}^2, \quad F_1 = 24,33 \text{ м}^2, \quad F_2 = 29,93 \text{ м}^2,$$

$$F_{\text{вн}} = 20,44 \text{ м}^2, \quad S_1 = 0,344 \text{ м}^2, \quad S_2 = 0,120 \text{ м}^2,$$

$$F_{12} = 28,96 \text{ м}^2.$$

Коэффициенты теплопроводности для Шамот – легковес ШЛ – 1,0 и Диатомитовый кирпич Д-500 соответственно:

$$\lambda_1 = 0,520 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\alpha_{\text{в}} = 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Зададимся температурами между слоями футеровки и наружной поверхности кладки соответственно равными  $t_{1,2} = 494 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{нар}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , тогда:

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{12}}{2} = \frac{880 + 494}{2} = 687^\circ\text{C} \quad (37)$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{12}}{2} = \frac{60 + 494}{2} = 277^\circ\text{C} \quad (38)$$

Значения коэффициентов теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,520 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 960 = 0,760 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 550 = 0,196 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{0,344}{0,760 \cdot 24,33} = 0,0186 \text{ }^\circ\text{C/Вт} \quad (39)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} = \frac{0,120}{0,196 \cdot 29,93} = 0,0205 \text{ }^\circ\text{C/Вт} \quad (40)$$

где  $R_1, R_2$  – тепловые сопротивления слоев кладки;  $^\circ\text{C/Вт}$ .

$$Q_{\text{бок.ст.}} = \frac{880 - 20}{\frac{0,344}{0,760 \cdot 24,33} + \frac{0,120}{0,196 \cdot 29,93} + \frac{1}{15 \cdot 30,94}} = 20,823 \text{ кВт}$$

Проверка:

$$t_{1,2} = t_n - Q_{\text{бок.ст.}} \cdot R_1 = 880 - 20823 \cdot 0,0186 = 492,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (41)$$

$$t_{\text{нар}} = t_n - Q_{\text{бок.ст.}} \cdot (R_1 + R_2) = 880 - 20823 \cdot (0,0186 + 0,0205) = 65,8^\circ\text{C} \quad (42)$$

Результаты расчета удовлетворительны

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

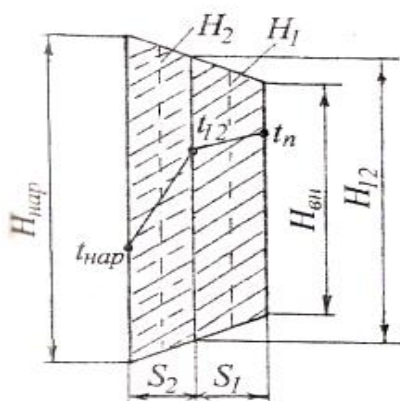


Рисунок 15 – Эскиз торцевых стенок печи [13]

Расчет потерь тепла через торцевые стенки. Эскиз торцевых стенок печи показан на рисунке 13.

$$F_{нар} = 10,8 \text{ м}^2, \quad F_1 = 7,62 \text{ м}^2, \quad F_2 = 10,2 \text{ м}^2,$$

$$F_{вн} = 5,97 \text{ м}^2, \quad S_1 = 0,344 \text{ м}^2, \quad S_2 = 0,120 \text{ м}^2,$$

$$F_{12} = 9,74 \text{ м}^2.$$

Коэффициенты теплопроводности для Шамот – легковес ШЛ – 1,0 и Диатомитовый кирпич Д-500 соответственно:

$$\lambda_1 = 0,520 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\alpha_B = 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Зададимся температурами между слоями футеровки и наружной поверхности кладки соответственно равными  $t_{1,2} = 474^\circ\text{C}$ ,  $t_{нар} = 60^\circ\text{C}$ , тогда:

$$t_1 = \frac{t_n + t_{12}}{2} = \frac{880 + 460}{2} = 677^\circ\text{C}$$

$$t_2 = \frac{t_{нар} + t_{12}}{2} = \frac{60 + 460}{2} = 267^\circ\text{C}$$

Значения коэффициентов теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,520 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 950 = 0,756 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 549 = 0,194 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{0,344}{0,756 \cdot 7,62} = 0,0597 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2 \cdot F_2} = \frac{0,120}{0,194 \cdot 10,2} = 0,0606 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

где  $R_1, R_2$  – тепловые сопротивления слоев кладки;  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

$$Q_{\text{торц.ст.}} = \frac{880 - 20}{\frac{0,344}{0,756 \cdot 7,62} + \frac{0,120}{0,194 \cdot 10,2} + \frac{1}{15 \cdot 10,85}} = 6,80 \text{ кВт}$$

Проверка:

$$t_{1,2} = t_n - Q_{\text{торц.ст.}} \cdot R_1 = 880 - 6800 \cdot 0,0597 = 473,9^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = t_n - Q_{\text{торц.ст.}} \cdot (R_1 + R_2) = 880 - 6800 \cdot (0,0597 + 0,0606) = 61,8^\circ\text{C}$$

Результаты расчета удовлетворительны.

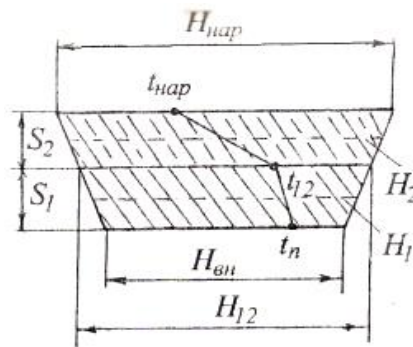


Рисунок 16 – Эскиз свода печи [13]

Расчет потерь тепла через свод печи. Эскиза свода печи показал на рисунке 13.

Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки свода:

$$r_{\text{п}} = 3,130 \text{ м}; \quad r_{1,2} = 3,430 \text{ м}; \quad r_{\text{нар}} = 3,500 \text{ м}; \quad l = 10,324 \text{ м};$$

$$r_1 = \frac{r_n + r_{1,2}}{2} = \frac{3,13 + 3,43}{2} = 3,28 \text{ м}; \quad (43)$$

$$r_2 = \frac{r_{\text{нар}} + r_{1,2}}{2} = \frac{3,50 + 3,43}{2} = 3,465 \text{ м}; \quad (44)$$

$$S_1 = 0,300 \text{ м}; \quad S_2 = 0,070 \text{ м}$$

Коэффициенты теплопроводности для Шамот класса «Б» и Диатомитовый кирпич Д-500 соответственно:

$$\lambda_1 = 0,923 + 0,438 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$\alpha_B = 15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

Зададимся температурами между слоями футеровки и наружной поверхности кладки соответственно равными  $t_{1,2} = 500^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{нар}} = 70^\circ\text{C}$ , тогда:

$$t_1 = \frac{t_{\text{п}} + t_{12}}{2} = \frac{880 + 500}{2} = 690^\circ\text{C};$$

$$t_2 = \frac{t_{\text{нар}} + t_{12}}{2} = \frac{70 + 500}{2} = 285^\circ\text{C}.$$

Значения коэффициентов теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,923 + 0,438 \cdot 10^{-3} \cdot 963 = 1,225 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$\lambda_2 = 0,132 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 558 = 0,198 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_1 \cdot 0,33 \cdot \pi \cdot l} = \frac{\ln\left(\frac{3,465}{3,28}\right)}{1,225 \cdot 0,33 \cdot 3,14 \cdot 10,324} = 0,004^\circ\text{C/Вт} \quad (45)$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{нар}}}{r_2}\right)}{\lambda_2 \cdot 0,33 \cdot \pi \cdot l} = \frac{\ln\left(\frac{3,50}{3,465}\right)}{0,198 \cdot 0,33 \cdot 3,14 \cdot 10,324} = 0,0047^\circ\text{C/Вт} \quad (46)$$

где  $R_1, R_2$  – тепловые сопротивления слоев кладки;  $^\circ\text{C/Вт}$ .

$$Q_{\text{св}} = \frac{0,33 \cdot \pi \cdot l (t_n - t_0)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{нар}}}{r_2}\right)}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_B \cdot r_{\text{нар}}}}, \text{ Вт} \quad (47)$$

$$Q_{\text{св}} = \frac{0,33 \cdot 3,14 \cdot 10,324 (880 - 20)}{\frac{\ln\left(\frac{3,465}{3,28}\right)}{1,225} + \frac{\ln\left(\frac{3,50}{3,465}\right)}{0,198} + \frac{1}{15 \cdot 3,50}} = 90,57 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Проверка:

$$t_{1,2} = t_n - Q_{\text{св}} \cdot R_1 = 880 - 90560 \cdot 0,0042 = 500,86^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{нар}} = t_n - Q_{\text{св}} \cdot (R_1 + R_2) = 880 - 90560 \cdot (0,0042 + 0,0047) = 72,02^\circ\text{C}$$

Результаты расчета удовлетворительны

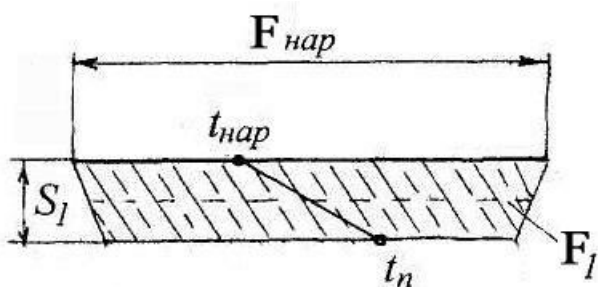


Рисунок 17 - Эскиз пода печи [13]

Расчет потерь тепла, через под печи, который состоит из одного слоя. Эскиз футеровки приведен на рисунке 17.

Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки пода:

$$F_{нар} = 44,37 \text{ м}^2, \quad F_1 = 31,14 \text{ м}^2,$$

$$S_1 = 1 \text{ м.}$$

Коэффициенты теплопроводности для Шамот класса «Б» соответственно:

$$\lambda_1 = 0,923 + 0,438 \cdot 10^{-3} \cdot t, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\alpha_B = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$t_{п} = 880^\circ\text{C} \quad t_{нар} = 63^\circ\text{C} \quad t_0 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \frac{t_{п} + t_{нар}}{2} = \frac{880 + 63}{2} = 417,5^\circ\text{C.}$$

Значения коэффициентов теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,923 + 0,438 \cdot 10^{-3} \cdot 690,5 = 1,13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot F_1} = \frac{1}{1,13 \cdot 31,14} = 0,0028 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

где  $R_1$ , – тепловые сопротивления слоев кладки;  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ .

$$Q_{под.} = \frac{880 - 20}{\frac{1}{1,3 \cdot 31,14} + \frac{1}{15 \cdot 44,37}} = 28,73 \text{ кВт}$$

Проверка:

$$t_{нар} = t_n - Q_{под.} \cdot R_1 = 880 - 28730 \cdot 0,028 = 63,17^\circ\text{C}$$

Результаты расчета удовлетворительны.

Тепло, теряемое вследствие теплопроводности кладки печи найдем, подставив численные значения потерь тепла в результате теплопроводности через под, свод и стены печи в формулу (33):

$$Q_{\text{кл}} = 2 \cdot 20,823 + 2 \cdot 6,8 + 90,57 + 28,73 = 174,55 \text{ Вт}$$

#### 2.5.2.4 Потери тепла через открытые загрузочные, разгрузочные окна и другие отверстия в футеровке

Расчет потерь тепла излучением в окружающую среду производится по формуле:

$$Q_{\text{изл}} = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot F_{\text{отв}} \cdot \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_v}{100} \right)^4 \right] \cdot \Delta\tau, \text{ Вт}, \quad (48)$$

где  $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  - константа излучения абсолютно черного тела

$\varphi$  – коэффициент диафрагмирования, зависит от соответствия ширины и высоты отверстия и толщины стенки (рисунок);

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

$T_n$  – температура печи, К;

$T_v$  – температура окружающей среды, К;

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

$\Delta\tau$  – доля времени, в течение которого открыто окно.

Коэффициент диафрагмирования загрузочного окна определяем по рисунку 18.

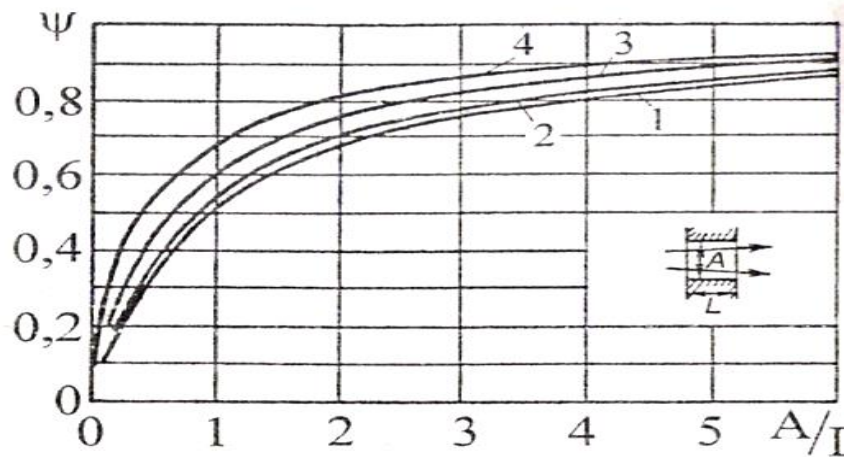


Рисунок 18 – Коэффициент диафрагмирования отверстий [13]  
 Форма отверстий: 1 – круглое отверстие; 2 – квадратное отверстие;  
 3 – прямоугольное отверстие при ширине окна  $B = 2A$  ( $A$  – высота,  
 $L$  – глубина окна); 4 – узкая щель высотой  $A$  ( $B \gg A$ )

В данном случае форма отверстия близка к квадрату, отношение  $A/L$  примерно равно 4, таким образом  $\varphi = 0,83$ .

Примем  $\tau_{\text{откр}} = 5 \text{ мин} = 0,5 \text{ ч}$ .

Долю времени, в течение которого, окно открыто определяем по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{общ}}} = \frac{0,5}{11,9} = 0,04. \quad (49)$$

Подставляем полученные данные в формулу:

$$Q_{\text{луч}} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,83 \cdot 5,97 \cdot \left[ \left( \frac{1153}{100} \right)^4 - \left( \frac{293}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,04 = 15,83 \text{ Вт}$$

#### 2.5.2.5 Потери тепла вследствие тепловых коротких замыканий

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

$$Q_{\text{ткз}} = (0,5 \dots 1,0) \cdot Q_{\text{кл}}, \text{ Вт}, \quad (50)$$

$$Q_{\text{ткз}} = 0,5 \cdot 174,55 = 87,27 \text{ В},$$

### 2.5.2.6 Тепло, уносимое уходящими продуктами сгорания.

$$Q_{nc} = BV_{nc}c_{nc}t_{nc}, \text{ Вт}, \quad (51)$$

где  $V_{nc}$  – количество продуктов сгорания  $\text{м}^3$  топлива при нормальных условиях;

$c_{nc}$  – теплоемкость уходящих дымовых газов,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

$t_{nc}$  – температура уходящих дымовых газов,  $^{\circ}\text{C}$

Температура продуктов сгорания, покидающих печь, для камерных печей принимается:

$$t_{nc} = t_{\text{МК}} + (50..100), ^{\circ}\text{C} \quad (52)$$

Примем температуру продуктов сгорания, покидающих печь  $910^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{nc} = B \cdot 11,66 \cdot 1183 \cdot 1,460 = B \cdot 20139 \text{ кВт},$$

Таким образом, расход тепла:

$$\begin{aligned} Q_{\text{рас}} &= Q_{\text{м}} + Q_{\text{Т}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{луч}} + Q_{\text{ткз}} + Q_{\text{пс}}, \quad (53) \\ Q_{\text{рас}} &= 459 + 23,54 + 174,55 + 15,83 + 87,27 + 20,14 \cdot B = \\ &= 780,33 + 20139 \cdot B \text{ кВт} \end{aligned}$$

Составим уравнение теплового баланса относительно расхода топлива  $B$ :

$$\begin{aligned} Q_{\text{пр}} &= Q_{\text{расх}}, \quad (54) \\ 36671,31 \cdot B &= 780,33 + 20139 \cdot B, \\ B &= 0,0472 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Зная расход топлива, определим:

$$Q_{\text{Т}} = 36671,31 \cdot 0,0472 = 1790,89 \text{ кВт}$$

$$Q_{nc} = 20139 \cdot 0,0472 = 950,6 \text{ кВт}.$$

Данные статей прихода и расхода тепла сведем в таблицу 12.



Таблица 12 – Тепловой баланс камерной печи

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
Тепло, полученное при сжигании топлива	1790,89	100	Полезное тепло на нагрев металла	459	26,88
			Потери тепла вследствие теплопроводности кладки печи	174,55	10,22
			Потери тепла через открытое загрузочное и разгрузочное окно	15,83	0,93
			Потери тепла вследствие тепловых коротких замыканий	87,27	5,11
			Потери тепла на нагрев приспособлений	20,14	1,18
			Тепло, уносимое уходящими продуктами сгорания	950,6	55,68
Итого	1790,89	100	Итого	1707,39	100

## 2.6 Расчет КПД камерной печи

КПД для печи определяется по формуле

$$\eta = \frac{Q_{\text{т}}}{Q_{\text{расх}}} \cdot 100\%, \quad (55)$$

где  $Q_{\text{м}}$  – полезное тепло, идущее на нагрев металла, Вт;

$Q_{\text{расх}}$  – суммарные затраты тепла печью выбранной конструкции, Вт.

$$\eta = \frac{459}{1707,39} \cdot 100\% = 26,9 \%$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – 2-е изд.: М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
2. Гуляев, А. П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во Металлургия, 1986 – 544 с.
3. Грановский, Г. И. Резание металлов: учебник для машиностр. и прибор. спец. вузов / Грановский Г.И., Грановский В.Г. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
4. Попов, А.А. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: справочник / А.А. Попов, Л.Е. Попова. – М.: Машгиз, 1961 – 430 с.
5. Меськин, В. С. Основы легирования стали / В.С. Меськин. – 2-е изд.: М.: Металлургия, 1964. – 684 с.
6. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия: учебник для вузов / Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. – 6 – изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 – 768 с.
7. Еланский, Г.Н. Основы производства и обработки металлов: учебник / Г. Н. Еланский, Б. В. Линчевский, А. А. Кальменев. – М.: МГВМИ, 2005. – 416 с.
8. Поволоцкий, Д.Я. Основы технологии производства стали: учебное пособие / Д. Я. Поволоцкий. – 2-е изд., испр. и дополн. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 191 с.
9. Зотов, В. Ф. Производство проката / В.Ф. – М.: «Интермент Инжиниринг», 2000. – 352 с.
10. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства: учебник для техникумов / В. Б. Бахтинов. – М.: Металлургия, 1983. – 488с.
11. Гольдштейн, М. И. Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – Москва: Изд-во Металлургия, 1985 – 408 с.
12. Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали: учебное пособие / М.А. Смирнов, В.М. Счастливец, Л.Г. Журавлев. – Екатеринбург: УрОРАН, 1999. – 496 с.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

13. Корягин, Ю.Д. Тепловые и электрические расчеты термических печей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин. – 2-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 178 с.

					22.03.02.2017.104.00.000 ПЗ	70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		