

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра «Материаловедения и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_      \_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ »      \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Разработка технологии изготовления отливки из жаропрочного сплава с использованием  
различных программ моделирования  
тема

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
код и наименование направления

\_\_\_\_\_  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	_____	<u>В.А. Кукарцев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>С.Ю. Купреев</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	<u>Ц.М. Асатрян</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра «Материаловедения и технологии обработки материалов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Темных  
подпись            инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме магистерской диссертации**

Студент Купреев Сергей Юрьевич

Группа МТ17-01М Направление (специальность) 22.04.01.04

«Синтез и литье новых металлических материалов»

Тема выпускной квалификационной работы:

«Разработка технологии изготовления отливки из жаропрочного сплава с использованием различных программ моделирования»

Утверждена приказом по университету № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР В.А. Кукарцев канд. техн. наук, доцент кафедры  
МиТОМ

Исходные данные для ВКР:

- изучить свойства жаропрочных сплавов, обладающих высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред;
- разработать технологию производства отливок из стали мартенситного класса с использованием программ моделирования литейных процессов: LVMflow и ProCAST;
- произвести выбор необходимого технологического оборудования

Перечень разделов ВКР

1. Характеристика жаропрочных сплавов. Общие сведения
2. Классификация жаропрочных сплавов их применение
3. Литейные свойства жаропрочных сплавов
4. Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки жаропрочных сплавов
5. Способы изготовления форм для получения отливок из жаропрочных сплавов
6. Литье по выплавляемым моделям
7. Разработка технологии производства отливок из сплава 20Х5МЛ
8. Построение 3D модели в САПР SolidWorks
9. Моделирование литейных процессов в программе LVMflow
10. Моделирование литейных процессов в программе ProCAST
11. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок
12. Расчёт норм расхода основных материалов

Перечень графического материала:

- чертеж детали;
- чертёж отливки;
- схемы модельного блока;
- схема технологического процесса.

Руководитель ВКР В.А. Кукарцев \_\_\_\_\_

инициалы и фамилия

подпись

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

С.Ю. Купреев

подпись, инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Разработка технологии изготовления отливки из жаропрочного сплава с использованием различных программ моделирования» содержит 81 лист, 57 рисунков, 20 таблиц, 24 используемых источников.

Цель работы Разработка технологии производства отливок из жаропрочного сплава с использованием САПР SolidWorks, программ моделирования литейных процессов LVMflow и ProCAST.

Задачи:

- Изучить свойства жаропрочных сплавов;
- Изучить особенности коэффициента использования материала, пути его увеличения;
- Определить эффективность использованных в работе программ моделирования литейных процессов.

В результате проделанной работы были рассмотрены характеристики жаропрочных сплавов, их классификация и применение в производстве, литейные свойства жаропрочных сплавов, и современное плавильное оборудование. А так же способы изготовления форм для получения отливок из жаропрочных сплавов при литье по выплавляемым моделям.

Была разработана технология изготовления отливок способом литья по выплавляемым моделям из сплава 20Х5МЛ. А именно: произведен расчет литниково-питающей системы, построена 3D модель в САПР SolidWorks, произведено моделирование литейных процессов в программах LVMflow и программе ProCAST, проведены изменения, устраняющие дефекты в отливке, определен выход годного, и исходя из этого, произведен выбор необходимого технологического оборудования.

Прежде чем получить удовлетворительный результат, было проведено 7 исследований, с различной конфигурацией литниково-питающей системы.

Наблюдение за развитием процессов и четкое хронометрирование образования дефектов в программах LVMFlow и ProCAST дает возможность понять, когда и в какой области дефекты могут возникнуть, что в свою очередь, дает возможность для быстрого реагирования и внесения изменений в конструкцию.

Завершающим этапом данной работы является расчет норм расхода на свежие шихтовые материалы. Он показал преимущество использования программы ProCAST при разработке технологии изготовления отливок.

Выполненная работа соответствует требованиям технического задания.

## АННОТАЦИЯ

К настоящему времени в мире разработана и используется достаточно широкая номенклатура жаропрочных сплавов, различающихся по химическому составу, структуре и свойствам. Большое внимание уделяется литейным сплавам. Сфера их применения достаточно обширна – современные жаропрочные сплавы позволяют создавать принципиально новые конструкции и технологии в различных отраслях машиностроения, авиакосмической и ракетной техники, приборостроения, энергетики, медицины и др.

Важнейшей задачей современного производства полуфабрикатов и изделий из литейных сплавов является снижение их трудоемкости и увеличение коэффициента использования металла. Одним из способов увеличения коэффициента использования металла, является использование программ моделирования литейных процессов при изготовлении литых заготовок.

В данной магистерской диссертации представлена разработка технологии производства отливок из жаропрочных сплавов на основе железа с использованием программ моделирования LVMFlowCV и ProCAST.

В ходе работы были изучены свойства жаропрочных сплавов. Был разработан технологический процесс изготовления отливок способом литья по выплавляемым моделям из сплава 20Х5МЛ, с применением программ моделирования LVMflow и ProCAST. Произведен выбор необходимого технологического оборудования. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования использованных программ.

Выполнен расчет норм расхода на свежие шихтовые материалы  
Ключевые слова:

**СТАЛЬ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА, ОТЛИВКА, ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ, КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЛИТЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ.**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Характеристика жаропрочных сплавов. Общие сведения .....	7
2 Классификация жаропрочных сплавов их применение .....	8
2.1 Деформируемые жаропрочные сплавы.....	24
2.2 Литейные жаропрочные сплавы .....	27
3 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки жаропрочных сплавов.....	33
4 Способы изготовления форм для получения отливок из жаропрочных сплавов.....	39
5 Литье по выплавляемым моделям.....	40
6 Разработка технологии производства отливок из сплава 20Х5МЛ.....	43
6.1 Характеристика отливки представителя.....	44
6.2 Обоснование выбора способа изготовления отливки .....	46
6.3 Выбор и обоснование конструкции ЛПС .....	47
6.4 Расчет элементов литниково-питающей системы .....	47
6.5 Разработка схемы модельного блока с элементами литниково-питающей системы.....	50
7 Построение 3D модели в САПР SolidWorks .....	51
8 Моделирование литейных процессов в программе LVMflow.....	53
9 Моделирование литейных процессов в программе LVMflow.....	61
10 Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок.....	66
11 Расчёт шихтовых материалов, нормы расхода основных материалов и расчет стоимости.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	80

## ВВЕДЕНИЕ

Среди всех видов заготовительных производств литейное занимает ведущее место, обеспечивая коэффициент использования материала до 70-90%. Существующие технологии позволяют изготавливать отливки массой от нескольких граммов до 100 и более тонн. На сегодняшний день литейные производства существуют в виде самостоятельных литейных заводов, в виде цехов (участков) машиностроительных производств, металлургических комплексов, горно-обогатительных комбинатов, судостроительных компаниях, ремонтно-механических заводов и т.д. Их структура зависит от номенклатуры изготавливаемых отливок и необходимого их количества. Всё это оказывает влияние на применяемую технологию изготовления форм, а именно: разовые песчано-глинистые формы, формы из холодно-твердеющих смесей (ХТС), формы из жидкостекольных смесей (ЖСС), оболочковые формы и т.д.

Важнейшей задачей современного производства полуфабрикатов и изделий из литейных сплавов является снижение их трудоемкости и увеличение коэффициента использования металла. Один из способов увеличения коэффициента использования металла, является использование программ моделирования литейных процессов.

Компьютерное моделирование становится неотъемлемой частью процессов конструирования новых деталей и проектирования технологических процессов их изготовления. Оно приобретает статус важного, а зачастую решающего конкурентного преимущества. Все чаще заказчики на литейную продукцию в списке требований к производителю этой продукции выдвигают требование об обязательном использовании компьютерного моделирования. Преимущества, предоставляемые системами автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП) очевидны. В первую очередь, это возможность отработки нюансов литейной технологии на виртуальном прототипе изготавливаемой отливки, что уменьшает или полностью исключает необходимость в изготовлении пробных отливок, сокращает процесс проектирования технологии и снижает себестоимость отливки. Визуализация физических процессов литейной технологии, таких как: заполнение расплавом полости литейной формы, охлаждение и затвердевание металла, его коробление под действием термических напряжений позволяет лучше понять особенности этих процессов, а, следовательно, более эффективно управлять ими с целью снижения брака при производстве отливок и повышения выхода годного.

Цель работы: Разработка технологии изготовления отливки из жаропрочного сплава с использованием различных программ моделирования литейных процессов.

Задачи: Изучить свойства жаропрочных сплавов. Коэффициент использования материала, пути его увеличения. Использование программ моделирования литейных процессов, способствующих снижению расхода материалов, причины, сдерживающие более широкое их применение на производстве.



## 1 Характеристика жаропрочных сплавов. Общие сведения.

Эффективное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности неразрывно связано с применением жаростойких сплавов специального назначения. Из них изготавливают ответственные элементы различных конструкций, оснастку и компоненты машин и оборудования, удовлетворяющие требованиям стойкости к деформации и прочности при эксплуатации под влиянием агрессивных жидких и газовых сред, в условиях высоких нагрузок и температур.

Жаропрочность – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах.

Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочности, ползучесть.

Кратковременная прочность определяется с помощью испытаний на растяжение разрывных образцов. Образцы помещают в печь и испытывают при заданной температуре.

Прочность зависит от продолжительности испытаний.

Пределом длительной прочности называется максимальное напряжение, которое вызывает разрушение образца при заданной температуре за определенное время.

Например,  $\sigma_{200}$  МПа, верхний индекс означает температуру испытаний, а нижний – заданную продолжительность испытания в часах. Для котельных установок требуется невысокое значение прочности, но в течение нескольких лет.

Ползучесть – свойство металла медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при постоянной температуре.

При испытаниях образцы помещают в печь с заданной температурой и прикладывают постоянную нагрузку. Измеряют деформацию индикаторами.

При обычной температуре и напряжениях выше предела упругости ползучесть не наблюдается, а при температуре выше 0,6  $T_{пл}$ , когда протекают процессы разупрочнения, и при напряжениях выше предела упругости наблюдается ползучесть.

В зависимости от температуры скорость деформации при постоянной нагрузке выражается кривой состоящей из трех участков. Кривая ползучести изображена на рисунок 1.

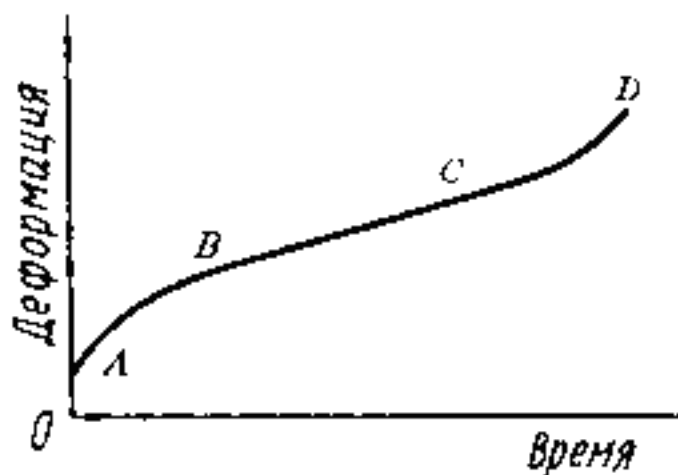


Рисунок 1 – Кривая ползучести

ОА – упругая деформация образца в момент приложения нагрузки;  
 АВ – участок, соответствующий начальной скорости ползучести;  
 ВС – участок установившейся скорости ползучести, когда удлинение имеет постоянную скорость.

Если напряжения достаточно велики, то протекает третья стадия (участок CD), связанная с началом разрушения образца (образование шейки).

Для углеродистых сталей ползучесть наблюдается при нагреве выше 400°C.

Предел ползучести – напряжение, которое за определенное время при заданной температуре вызывает заданное суммарное удлинение или заданную скорость деформации. [1]

## **2 Классификация используемых жаропрочных сплавов их применение**

Основой жаропрочных сплавов составляют жаропрочные стали.

К ним относят сплавы на основе железа, если содержание последнего превышает 50 %.

В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов жаропрочные стали могут быть низко-, средне- и высоколегированными.

В низколегированной стали суммарное содержание легирующих элементов не превышает 4–5 %. Среднелегированной называется сталь с суммарным содержанием легирующих элементов от 5 до 9 %, причем содержание каждого из них не должно превышать 5 %. Высоколегированной называют сталь, в которой содержание любого легирующего элемента превосходит 5 %, либо суммарное содержание всех легирующих элементов — более 10 %.

По микроструктуре (получаемой после охлаждения на воздухе с высокой температуры) жаропрочные стали подразделяют на семь классов: перлитный, мартенситный, мартенситно-ферритный, ферритный, аустенитно-мартенситный, аустенитно-ферритный, аустенитный.

Низколегированные стали относятся к перлитному классу, среднелегированные — к перлитному, мартенситному или мартенситно-ферритному, высоколегированные — к любому из перечисленных классов, кроме перлитного.

К сплавам на железоникелевой основе относятся сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в железоникелевой основе. Суммарное содержание железа и никеля не менее 65 %.

К сплавам на никелевой основе относятся сплавы, содержащие не менее 50 % Ni, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в никеле (содержание железа не более 6–8 %).

### **Стали перлитного класса**

Среди низколегированных сталей высокой жаропрочностью отличаются молибденсодержащие стали, например, хромомолибденовые, хромомолибденованадиевые, хромомолибденовольфрамванадиевые, имеющие достаточно высокие сопротивление ползучести и длительную прочность при температурах до 565–580 °С. Такие стали условно называют теплоустойчивыми. Сталь перлитного класса изображена на рисунке 2.

Химический состав теплоустойчивых сталей перлитного класса приведен в ГОСТ 20072–74, ГОСТ 4543–71, ТУ 14-1-1391–75. Они содержат 0,5–3,3 % Cr; 0,25–1,2 % Mo; 0,15–0,8 % V. Некоторые марки содержат 0,3–0,8 % W либо Nb.

Эти стали применяют для изготовления различных деталей в котлостроении, работающих длительное время (10 000–100 000 ч) при температурах 500–580°С. В частности, для паропроводных и пароперегревательных труб, а также для проката и поковок, используемых в турбинах и паровых котлах высокого давления.

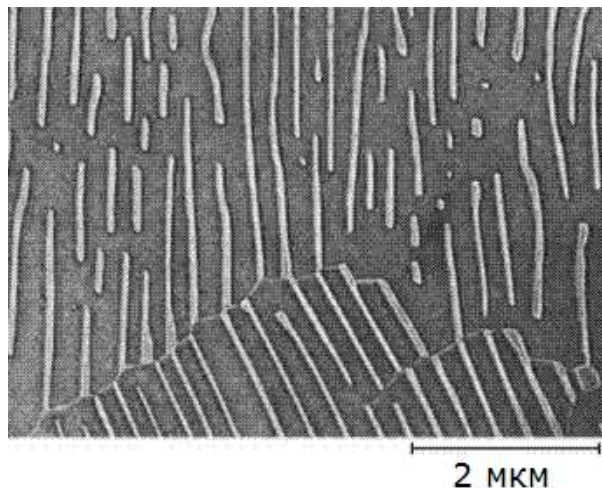


Рисунок 2 – Микроструктура пластинчатого перлита

### **Стали мартенситно-ферритного класса**

Стали мартенситно-ферритного класса содержат в структуре кроме мартенсита 10–25 % феррита. Основная легирующая добавка и в этих сталях — Cr (11–13 %), наряду с которым присутствуют менее значительные присадки Ni, W, Mo, Nb, V (модифицированные хромистые стали). Их термическая обработка заключается либо в закалке с отпуском, либо в нормализации с отпуском. Механические свойства при надлежащей температуре отпуска практически равноценны. Уровень жаропрочных свойств после оптимальной термической обработки для большинства сталей мартенситно-ферритного класса также примерно одинаков. Однако наиболее высокие (при обработке на одинаковую твердость) характеристики жаропрочности при 500–600°C у стали 18X12ВМБФР.

Эти стали изготавливают в виде сортового проката и применяют в турбостроении для лопаток и дисков турбин, а также для крепежных деталей. Ориентировочная рабочая температура для стали 15X12ВНМФ — 550–580 °C и 570–600 °C — для стали 18X12ВМБФР.

### **Стали аустенитного класса**

Сталь аустенитного класса изображена на рисунок 3. В основном это хромоникелевые стали с содержанием Cr и Ni в пределах от 7 до 25 % каждого, наряду с которыми присутствуют W, Mo, Ti, Nb и др. В таблицах 1,2 приведены характеристики механических свойств сортового проката из жаропрочных сталей.

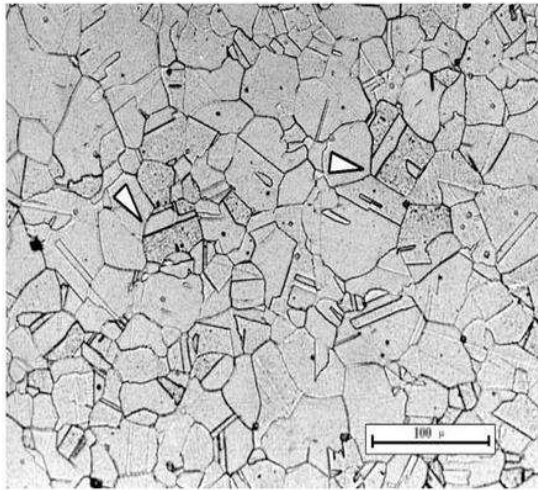


Рисунок 3 – Микроструктура аустенита

Это самая многочисленная группа жаропрочных сталей (ГОСТ 5632–72).

Таблица 1 – Характеристики механических свойств сортового проката из жаропрочных сталей при нормальной температуре

Сталь	Класс	Характеристики механических свойств				
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
12МХ	Перлитный	420	260	21	45	60
15ХМ		450	280	20	45	70
12Х1МФ		480	260	21	55	100
20ХМ		800	600	12	50	90
25Х1МФ		900	750	14	50	60
25Х2М1Ф		900	750	10	40	30
18Х3МВ		650	450	18	–	120
20Х3МВФ		900	750	12	40	80
15Х5М	Мартенситный	450	220	20	50	120
15Х5		400	170	24	50	100
15Х5ВФ*		400	220	22	50	120
40Х9С2*		750	500	15	35	–
40Х10С2М		950	750	10	35	> 20
15Х11МФ		755	568–755	14	50	59
18Х11МНФБ		740	590–735	15	50	59
20Х12ВНМФ		740	590–755	14	45	54
30Х13Н7С2		1200	800	18	25	> 20
11Х11Н2В2МФ		900	750	12	50	80
16Х11Н2В2МФ		1000	850	10	45	70

Окончание таблицы 1

Сталь	Класс	Характеристики механических свойств				
		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
20X13		660	450	16	55	80
13X11H2B2MФ–III		880	735	15	55	88
12X1	Мартенситно-ферритный	600	420	20	60	90
15X11MФ		700	500	15	55	120
15X12BHMФ		1080	930	13	55	88
15X12BHMФ		740	590–735	14	45	54
18X12BMBФP		750	500	14	50	60
18X12BMBФP–III		800	680	12	45	59
15X12B2MФ		800	600	15	50	70
20X20H14C2		Аустенитно-ферритный	590	295	35	55
20X23H13	490		295	35	50	–

Таблица 2 – Характеристики механических свойств сортового проката из жаропрочных аустенитных сталей при нормальной температуре

Сталь	Характеристики механических свойств				
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
10X11H20T3P	850	500	10	15	30
10X11H23T3MP	900	600	8	10	30
37X12H8Г8MФБ	850	600	15	20	–
45X14H14B2M	720	320	20	35	50
09X14H18B2Б	500	200	35	–	–
09X14H19B2BP	500	220	38	50	140
09X14H19B2BP1	520	220	30	44	120
37X12H8Г8MФБ	850	600	15	20	25
30X13Г18Ф	700	360	30	40	80
08X16H13M2Б	560	220	40	50	120
10X17H13M2T	520	220	40	55	–
08X17H15M3T	500	200	35	45	–
08X15H24B4TP	750	450	20	35	80
08X15H24B4TP	700	400	15	30	–
12X18H9	500	200	45	55	–
08X18H10T	520	200	40	55	–
12X18H9T	550	200	40	55	–
12X18H12T	550	200	40	55	–
08X18H12Б	500	180	40	55	–
36X18H25C2	650	350	25	40	–
36X18H25C2	855	550	17	18	50
30X19H9MBT	680	350	35	40	60

Окончание таблицы 2

Сталь	Характеристики механических свойств				
	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
31Х19Н9МВБТ	680	350	25	25	70
55Х20Н4АГ9М	1000	650	8	10	–
20Х20Н14С2	600	300	35	30	–
20Х23Н13	500	300	35	50	–
20Х23Н18	500	200	35	50	–
20Х23Н18	540	265	35	–	–
20Х25Н20С2	600	300	35	50	–

### Стали мартенситного класса

Мартенсит – это зерна игольчатой формы в микроструктуре металла, представляющие собой перенасыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе. Микроструктура мартенсита представлена на рисунке 4. Такая микроструктура характерна для сталей, прошедших процедуру закалки, а также для некоторых чистых металлов, обладающих полиморфизмом. Своим названием мартенсит обязан Адольфу Мартенсу – немецкому ученому, посвятившему большую часть своей жизни вопросам изучения металлов и их свойств. Следует отметить, что мартенситные стали из-за особенностей своей структуры отличаются самой высокой твердостью среди подобных материалов.

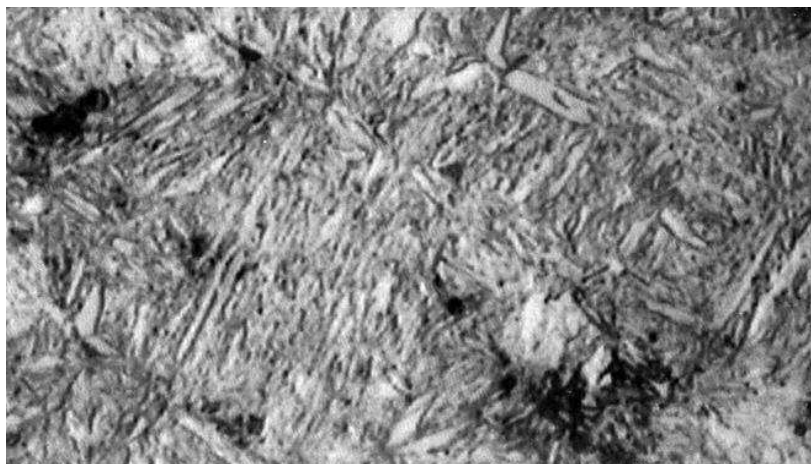


Рисунок 4 – Микроструктура мартенсита

С таким явлением, как мартенситное превращение, происходящим при нагреве и охлаждении стали, связан уникальный эффект «памяти металла», обнаруженный и описанный учеными Г.В. Курдюмовым и Л.Г. Хандросом в 1949 году. Суть данного эффекта заключается в том, что деформация

металла, создаваемая в нем в тот момент, когда происходит прямое мартенситное превращение, полностью исчезает во время обратного превращения. Благодаря этому эффекту ученым удалось создать сплавы, обладающие памятью своей формы. Изделия из таких сплавов, которые были подвергнуты деформации в мартенситном состоянии, принимают свою первоначальную форму, если их нагреть до температуры, вызывающей мартенситное превращение в стали. Рисунок 5 демонстрирует кристаллическую решетку мартенсита.

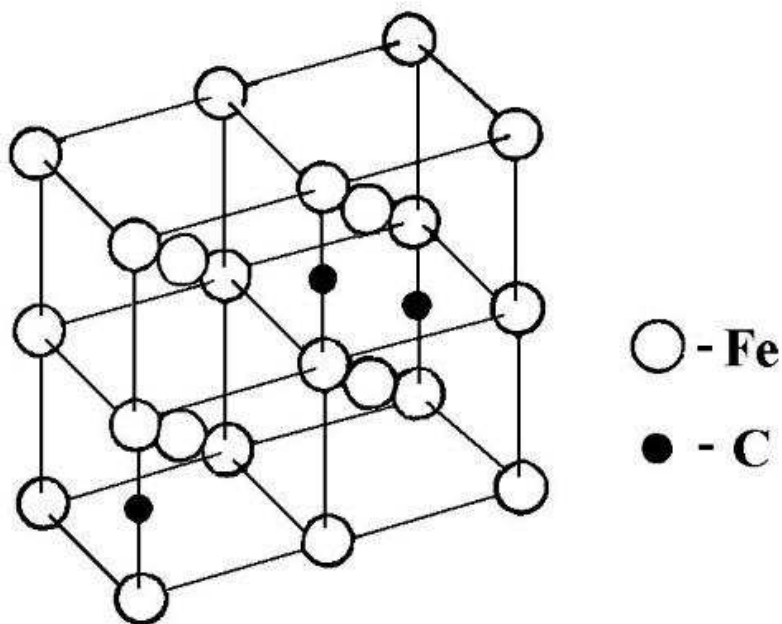


Рисунок 5 – Кристаллическая решетка мартенсита

Фазами, которыми характеризуются все стали мартенситного класса при их нагреве, являются:

- Феррит, в котором содержится очень незначительное количество углерода – до 0,02%. Элементарные ячейки кристаллической решетки феррита имеют форму куба, вершины, и центр которого образуют атомы железа. (Все остальное пространство в таких ячейках занимает углерод);
- Цементит, в котором содержание углерода значительно выше – до 6,67% (ромбическую кристаллическую решетку цементита формируют элементарные ячейки, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда).

Исходной структурой для образования мартенсита является аустенит. Кристаллические решетки данных образований, одновременно присутствующих в микроструктуре стали, связаны между собой ориентационными соотношениями. Заключается данная связь в том, что



плоскости решеток аустенита и мартенсита, которые имеют определенные кристаллографические индексы, параллельны друг другу.

Мартенсит, формирующий микроструктуру сталей, может присутствовать в ней в двух формах. Различные типы мартенсита, образующиеся при закалке аустенита, изображены на рисунке 6.

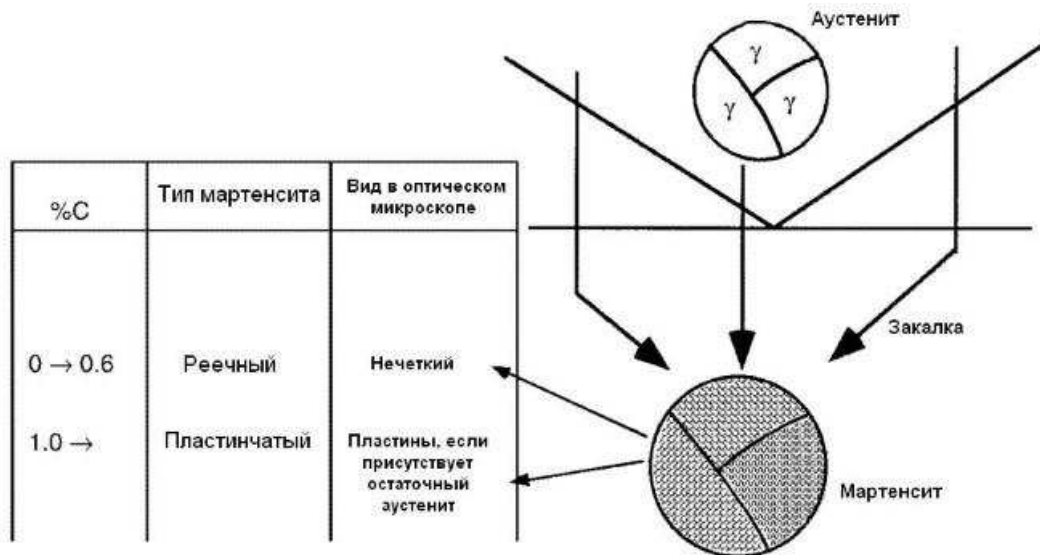


Рисунок 6 – Различные типы мартенсита, образующиеся при закалке аустенита

### *Пластинчатый (двойниковый) мартенсит*

Эта структура формируется при температуре ниже 2000. Она характерна для углеродистых и легированных сталей. Свойства мартенсита данного типа, присутствующего в структуре металла в виде пластин, определяет наличие на таких пластинах так называемого мидриба – средней линии, характеризующейся повышенной травимостью. Двойниковым данный мартенсит называют потому, что мидриб каждой его пластины образуется множеством двойников. Такие двойники, располагающиеся по плоскостям пластин мартенсита, имеют толщину 5–30 нм. Мартенсит пластинчатой структуры изображен на рисунке 7.

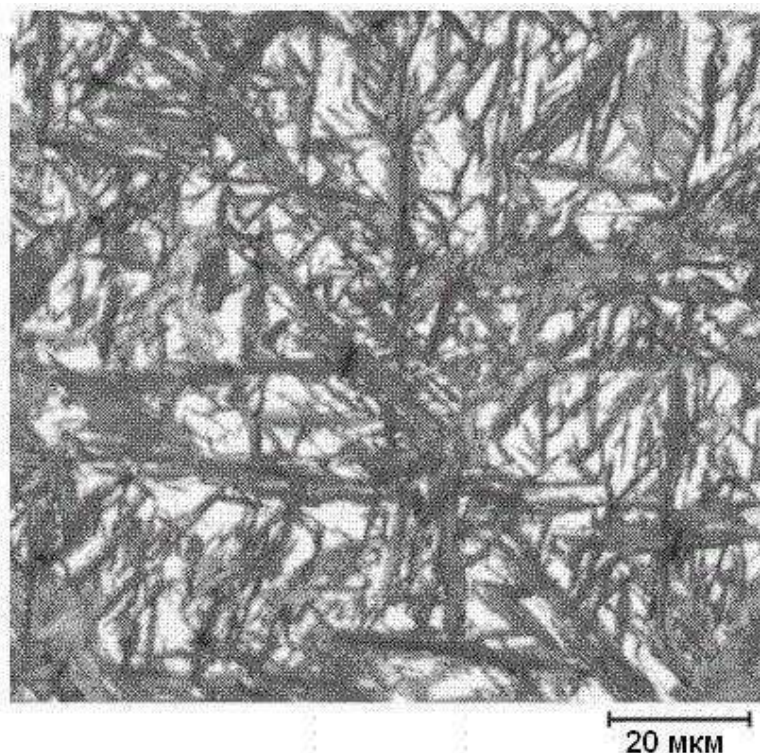


Рисунок 7 – Оптическая микрофотография мартенсита пластинчатой структуры

### *Речный (дислокационный) мартенсит*

Это образование характерно для структуры сталей, относящихся к высоколегированным, мало- и среднеуглеродистым сталям. Температурный порог, при котором в таких сталях происходит формирование мартенситной структуры, находится выше отметки 3000. Мартенсит данного типа в полном соответствии со своим названием имеет форму вытянутых в одном направлении реек, толщина каждой из которых находится в интервале 0,2–2 мкм (при этом их длина больше ширины примерно в 5 раз). Структура металла, сформированная из мартенсита данного типа, представлена в виде сочетания групп (пакетов) таких параллельных друг другу кристаллов-реек. В этой структуре можно увидеть и прослойки между рейками мартенсита, состоящие из остаточного аустенита. Толщина таких прослоек в сплавах разного типа может составлять от 10 до 20 нм. На рисунке 8 изображен мартенсит речной структуры.

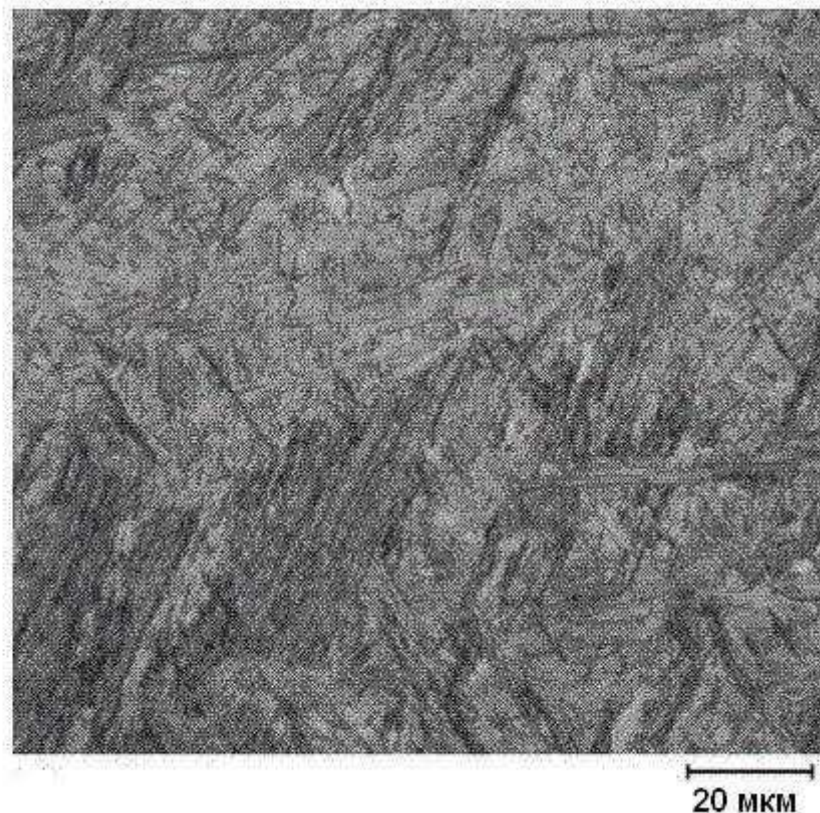


Рисунок 8 – Оптическая микрофотография мартенсита реечной структуры

При определенных условиях (в частности, когда интервал температур начала и завершения мартенситного превращения слишком большой) в сталях может сформироваться мартенсит обоих типов. Высокая температура приводит к снижению прочности аустенита, поэтому структура мартенсита, формирующегося при этом в сплаве, имеет реечную форму. При понижении температуры, когда прочность аустенита возрастает, в стали формируется мартенсит пластинчатого типа.

Существует определенная категория низкоуглеродистых сталей, в которых практически нет остаточного аустенита, а сформировавшийся мартенсит имеет только реечную форму. Температура, при которой в таких сталях наблюдаются мартенситные преобразования, составляет около 4000 С.

Условием для такого явления, как мартенситное превращение, выступает не фиксированная температура, а определенный температурный промежуток. Верхняя граница этого интервала соответствует температуре, которая меньше температуры начала аустенитного распада на несколько сот градусов. Окончание данного процесса происходит при температуре, которая значительно ниже комнатной. Такие условия формирования мартенсита связаны с тем, что при этом в структуре сплава присутствует еще и остаточный аустенит.

Количество мартенсита в структуре стали можно увеличить, если подвергнуть сплав пластической деформации. Схема изменений мартенсита в процессе деформации представлена на рисунке 9. Это необходимо делать



при температурном режиме, требующемся для мартенситного превращения. Аустенит может превращаться в мартенсит и в том случае, если сплав подвергается пластической деформации и при комнатной температуре.

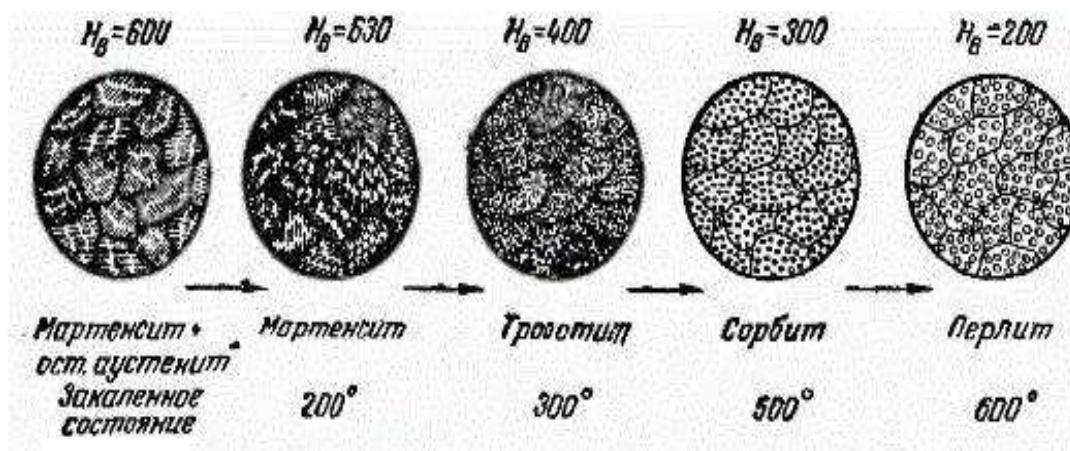


Рисунок 9 – Схема изменений мартенсита в процессе пластической деформации

Рассматриваемое образование в структуре стали может принимать форму, которая называется мартенсит отпуска. Условиями для его формирования является нагрев сплава до температуры, которая ниже, чем температура преобразования феррита в аустенит. Характерной чертой процесса, при котором образуется мартенсит отпуска, является то, что мартенсит, имеющий игольчатую или пластинчатую форму, превращается в карбидные включения сферической конфигурации.

Преобразование начальной структуры сплава в мартенситную, заключается в том, что молекулы в составе кристаллов такого сплава начинают упорядоченно передвигаться, меняя свое расположение относительно друг друга, и соответственно, формируя кристаллические решетки новой конфигурации. Образование кристаллов мартенсита в зерне аустенита представлено на рисунке 10. Таким образом, происходит не разрушение, а только деформация ячеек кристаллической решетки, что и приводит к образованию новой структуры сплава.

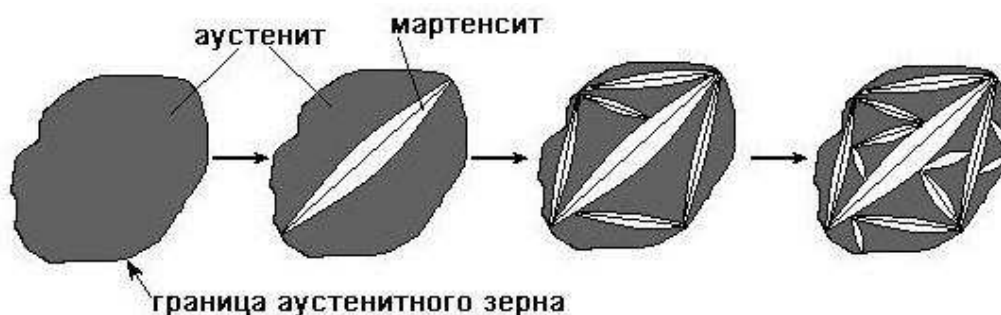


Рисунок 10 – Образование кристаллов мартенсита в зерне аустенита

Мартенситные преобразования в комбинации с модификациями атомного порядка компонентов и их перераспределения являются базой для разнообразных структурных превращений, которые дают возможность изменять характеристики кристаллических материалов посредством их механической либо термической обработки.

Особенности сталей, относимых к мартенситному классу:

- Высокий уровень противодействия коррозии в растворах щелочей, некоторых кислотных растворах, в условиях повышенной влажности;
- Высокая жаропрочность: данную полезную способность мартенситный металл получает в том случае, когда выполняется его закалка при температурах около 1050 градусов, а затем и отпуск на троостит либо сорбит;
- Способность к самозакаливанию;
- Малая пластичность при высоком показателе твердости, на которую не оказывают никакого влияния, дополнительно вводимые в сплав легирующие элементы;
- Высокая водородоустойчивость, свойственная таким маркам стали, как Х5ВФ, Х5М, Х9М;
- сложность обработки мартенситного металла резанием.

Популярные марки мартенситных стальных сплавов:

- 20Х13: в нем содержится от 12 до 14 % хрома, менее 0,8 % марганца и кремния, от 0,16 до 0,25 % углерода, такая сталь не легируется никелем;
- 10Х12НДЛ: особенность – большое содержание никеля (от 1 до 1,5 %);
- 18Х11МНФБ: не более 11,5 % хрома, от 0,5 до 1 % никеля, до 0,21 % углерода, от 0,8 до 1,1 % молибдена;
- 12Х11В2МФ, 10Х9МФБ, 13Х11Н2В2МФ, 15Х11МФ: легируются ванадием (от 0,18 до 0,4 %) и молибденом (от 0,35 до 1,1 %) в дополнение к стандартным добавкам.

Используются описываемые стали для производства:

- Роторов и корпусов газовых и паровых турбин;
- Сварных аппаратов и сосудов с нагрузками не более 16Мпа;
- Диафрагм турбин (паровых);
- Составляющих насосного оборудования;
- Лопаток турбин, работающих на пару;
- Пружин;

- Подвергающихся нагреву поверхностей коллекторов, котлов, трубопроводов;
- Хирургического, измерительного и режущего инструмента;
- Пластин компрессоров с клапанами [8].

### **Сплавы на железоникелевой основе**

Сплавы на железоникелевой основе изображены на рисунке 11. Они могут быть разделены на две группы: 1) с содержанием 14–16 % Cr и 32–38 % Ni и 2) с содержанием 20–25 % Cr и 25–45 % Ni (либо Ni + Mn). Сплавы первой группы дополнительно легированы вольфрамом и титаном и обладают высокой (приблизительно равной) жаропрочностью. Сплавы второй группы благодаря повышенному содержанию Cr жаростойкие, по жаропрочным свойствам они уступают сплавам первой группы, например, сплав ХН38ВТ.



Рисунок 11 – Внешний вид литых прутковых заготовок из сплава на железоникелевой основе

Сплавы ХН35ВТ, ХН35ВМТ, ХН35ВТЮ поставляют преимущественно в виде горячекатаных и кованных прутков и полос, а также поковок. Из сплавов ХН35В5Т, ХН38ВТ и Х25Н16Г7АР, в основном, изготавливают горячекатаный и холоднокатаный лист и ленту, а из сплава ХН45Ю — также и трубы. В основном, сплавы на железоникелевой основе применяют для изготовления деталей паровых и газовых турбин [11].

### **Сплавы на никелевой основе**

Сплавы на никелевой основе подразделяют на две группы (ГОСТ 5632–72): 1) сплавы, применяемые преимущественно как жаропрочные, и 2)

жаростойкие сплавы, обладающие необходимым минимумом жаропрочности.

Наиболее часто применяемые сплавы первой группы относятся к системе Ni—Cr—Ti—Al. Присутствие в этих сплавах Ti и Al в количествах, превышающих их предельную растворимость в твердом растворе при температурах 650–950 °С, позволяет достигнуть после закалки и отпуска существенного эффекта дисперсионного твердения, благодаря выделению дисперсных частиц интерметаллической фазы типа Ni<sub>3</sub> (Ti, NiAl). Такая микроструктура делает сплав устойчивым против температурного воздействия при 700–800 °С и выше. Жаропрочные никелевые сплавы изготавливают в виде сортового проката (прутки круглого сечения) и в виде поковок различной конфигурации. Сплавы на никелевой основе приведены на рисунке 12.

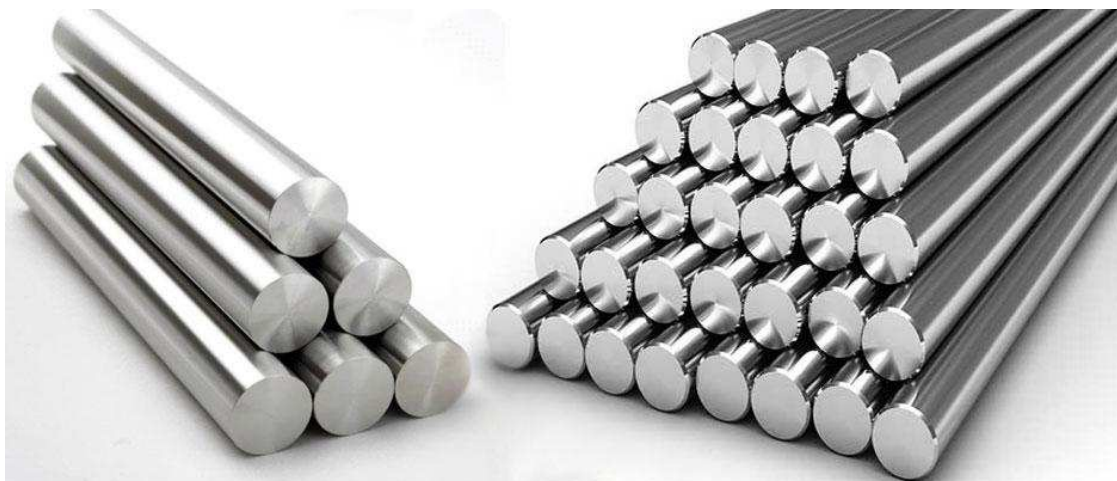


Рисунок 12 – Внешний вид литых прутковых заготовок из сплава на никелевой основе

Введение в дисперсионно-твердеющие сплавы этой группы W и Mo (в сумме до » 10 %), а также Nb дополнительно упрочняет твердый раствор, замедляет развитие диффузионных процессов и увеличивает количество дисперсной упрочняющей фазы. Количество дисперсной фазы увеличивают также путем увеличения суммарного содержания Ti и Al. Все это приводит к существенному возрастанию жаропрочности сплавов, что делает возможным их применение при температурах до 800–850 °С и высоких напряжениях.

К особенностям состава никелевых жаропрочных сплавов относится присутствие в них небольших добавок поверхностно-активных элементов (B, Ce, иногда Ba и Mg). Способствующих рафинированию металла и

упрочнению границ зерен, а также небольшое содержание в них примесей (S, P, Pb, др.).

Термическая обработка этих сплавов заключается в одинарном или двойном нагреве до высоких температур (1080–1200 °С) с охлаждением чаще всего на воздухе и последующем отпуске при температурах 700–850 °С. Для наибольшей стабилизации исходной структуры применительно к деталям с длительным сроком службы рекомендуется проводить многоступенчатый отпуск при постепенно понижающейся температуре.

Основное назначение этой группы высоколегированных сплавов — изготовление рабочих лопаток и дисков газовых турбин. Диски работают при более высоких напряжениях, чем лопатки (но при несколько пониженной температуре), поэтому материал диска должен иметь высокое сопротивление ползучести (особенно на ободке) и повышенную прочность (в ступичной части).

Прочность сплавов на никелевой основе сохраняется высокой вплоть до температур 800–900 °С. Так, при 800 °С временное сопротивление  $\sigma_b$  наиболее легированных сплавов составляет 700–800 МПа, 100-часовая длительная прочность — 250–300 МПа. В то же время характеристики пластичности  $\delta$  и  $\psi$  удовлетворительны при всех температурах испытания и несколько снижаются в температурном интервале дисперсионного твердения (700–800 °С). Остаточная деформация этих сплавов при испытаниях на длительную прочность при 700–800 °С порядка 3–10 %.

Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮР от температуры представлена на рисунке 13 [13].

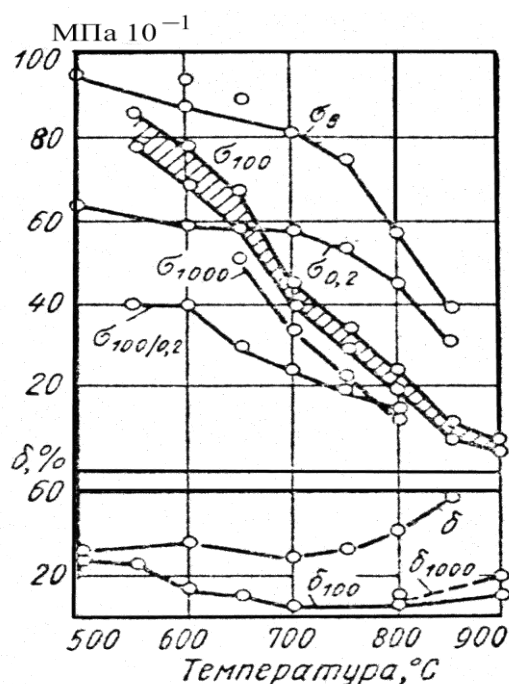




Рисунок 13 – Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮР от температуры

### **Сплавы на кобальтоникелевой основе**

Дополнительное легирование никелевых сплавов кобальтом повышает их жаропрочные свойства, а также улучшает технологическую пластичность. Содержание кобальта должно быть достаточно высоко. В отечественных марках таких сплавов содержание кобальта варьируют от 5 до 15 %. В зарубежных марках доводят до 30 %. Чем выше рабочая температура сплава, тем больше кобальта требуется для получения данного уровня жаропрочности.

Пределы длительной прочности на сроки 100 и 1000 ч типичных кобальтосодержащих сплавов. У всех этих сплавов высокое содержание алюминия (4,5–6 %), причем первые три сплава не содержат титана [7].

В авиационных двигателях основные требования к материалам для лопаток турбин обусловлены самим развитием конструкции двигателя – непрерывным повышением жаропрочности, пластичности, сопротивления термической и малоцикловой усталости, стойкости к воздействию газовой среды. Материалы для лопаток турбин современных двигателей должны обладать высокой сопротивляемостью разрушению при термической и малоцикловой усталости, которое является в настоящее время основным. Опасность разрушения усугубляется поверхностными реакциями, связанными с газовой коррозией, разупрочнением границ зерен.

Для изготовления лопаток турбин используют деформируемые и литейные сплавы. Деформируемые сплавы обладают ограниченными возможностями обеспечения необходимой жаропрочности, поскольку дальнейшее их легирование ведет к практически полной потере ими технологической пластичности при деформировании. Ведущее место среди жаропрочных сплавов принадлежит литейным, а также новым направленно-кристаллизованным и монокристаллическим сплавам, которые широко применяют в современных высокотемпературных двигателях. Схема Повышение рабочей температуры и пластичности литейных жаропрочных никелевых сплавов для лопаток турбин приведена на рисунке 14. Совершенствование технологии литья и многокомпонентного легирования обеспечило существенное увеличение рабочей температуры сплавов, причем направленные и монокристаллические сплавы группы ЖС стали более пластичными. Предельные рабочие температуры нагрева деформируемых сплавов не превышают 1000 °С [4].

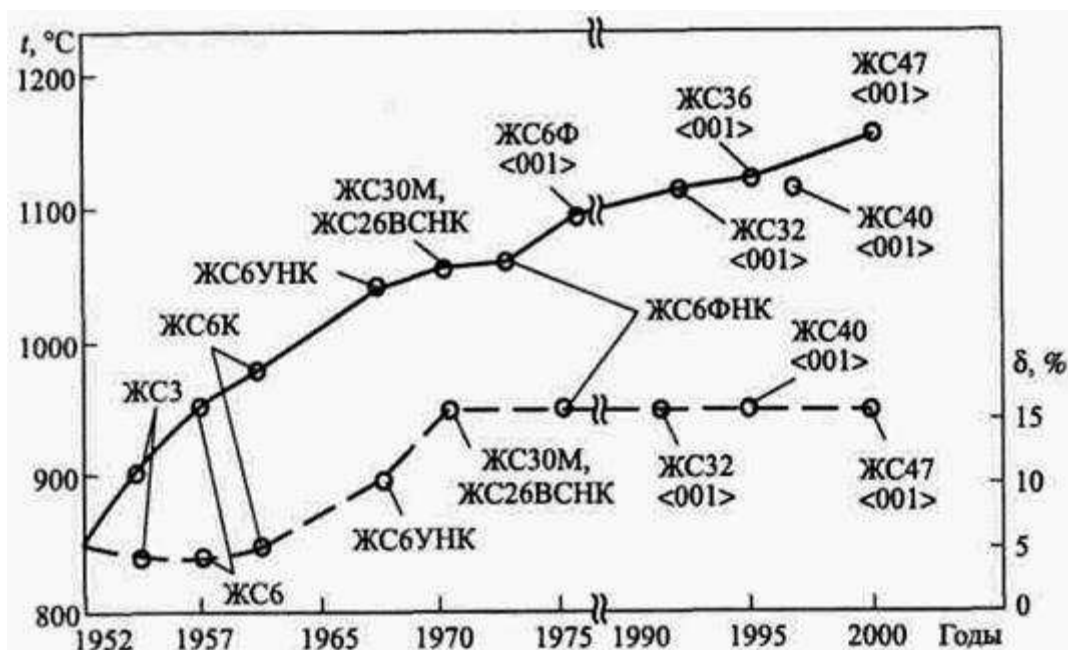


Рисунок 14 – Повышение рабочей температуры (сплошная линия) и пластичности (штриховая линия) литейных жаропрочных никелевых сплавов для лопаток турбин

## 2.1 Деформируемые жаропрочные сплавы

Материалы для дисков турбин и компрессора высокого давления, разработанные во ФГУП «ВИАМ»:

**ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК79-ИД, ЭК151-ИД** – жаропрочные сплавы с рабочей температурой до 750°C (с кратковременными забросами до 800°C).

**ЭП975-ИД** – высокожаропрочный сплав, не имеющий мировых аналогов, с рабочей температурой до 950°C. Детали, изготовленные из сплава ЭП975-ИД, приведены на рисунке 15.



Рисунок 15 – Роторы турбин конструкции «блиск» (диск с валом и лопатками) из сплава ЭП975-ИД для изделий кратковременного действия и вспомогательных силовых установок (ВСУ)

**ВЖ175-ИД** – высокожаропрочный деформируемый сплав, по комплексу свойств, превосходит известные материалы-аналоги: по кратковременной и

длительной прочности – на 15% (зарубежные сплавы Rene 88DT, N18, LSHR); по малоцикловой усталости – на 30% (отечественные порошковые сплавы). Сплав прошел промышленное опробование и внедрен в производство на заводах ОАО «МЗ "Электросталь"» и ОАО «СМК». Разработаны технологические параметры изготовления крупногабаритных штамповок дисков диаметром до 600 мм, массой до 180 кг. Проведены квалификационные испытания с определением расчетных значений прочностных характеристик на уровне -3.

Детали из сплава ВЖ175-ИД изображены на рисунке 16.



Рисунок 16 – Штамповки дисков ТВД (диаметром 500–600 мм) из сплава ВЖ175-ИД

Дисковые сплавы нашли широкое применение во всех серийных авиационных гражданских и военных ГТД, двигателях ракет, наземных ГТУ.

В последние годы разработаны новые свариваемые сплавы для деталей КС и корпусов:

**ВЖ159** – высокотехнологичный, свариваемый, ремонтпригодный, слабостареющий сплав с рабочими температурами до 1000 °С, применяется для высокотемпературных статорных деталей ГТД (жаровых труб, створок, экранов, сопла и т. д.).

**ВЖ171** – свариваемый, высокотемпературный, упрочняемый химико-термической обработкой сплав с рабочими температурами до 1250°С. Применяется для высокотемпературных статорных деталей ГТД (жаровых труб, створок, экранов, сопла и т. д.). Микроструктура сплава приведена на рисунке 17.

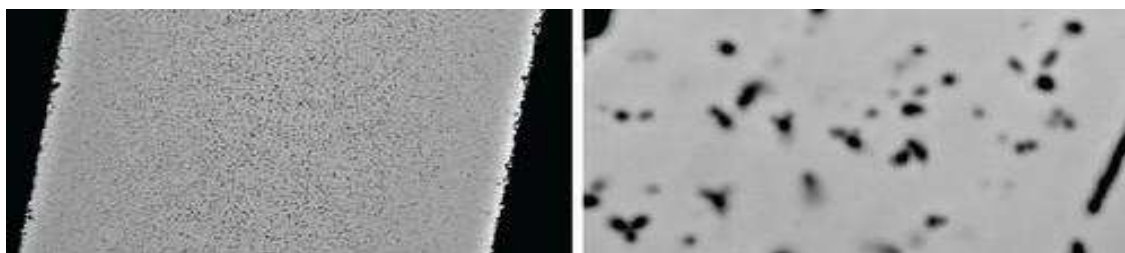


Рисунок 17 – микроструктура сплава ВЖ171

**ВЖ172** – высокопрочный свариваемый дисперсионно-твердеющий сплав для роторов КВД, корпусов и высоконагруженных деталей статора ГТД. Деталь из сплава ВЖ172, изображена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Цельнокатаные кольца (диаметром 840 мм) из сплава ВЖ172

Разработанные в ВИАМ жаропрочные свариваемые сплавы по комплексу механических свойств не уступают зарубежным сплавам аналогичного назначения, а по жаропрочности превосходят существующие серийные отечественные и зарубежные материалы. Разработаны и освоены в промышленном производстве технологии получения полуфабрикатов из жаропрочных сплавов ВЖ159 и ВЖ172. В таблице 3 изображены механические свойства деформируемых, жаропрочных материалов [12].

Таблица 3 – Механические свойства деформируемых жаропрочных сплавов

Сплав	Рабочая температура, °С	Содержание фазы % по массе	МПа	%	МЦУ: (при $N=104$ цикл; $=1$ Гц; $R=0$ )			
					при температуре, °С			
					650	750	650	750
ЭИ698-ВД	750	20-23	1158	17	706	412	834	716
ЭП742-ИД		30-35	1295	17	834	530	726	736
ЭК79-ИД		40-45	1354	18	893	600	853	726
ЭК151-ИД	800	45-50	1471	15	1010	638	1176	1080

ВЖ175-ИД		50-54	1595	15	1050	640	1275	1130
ЭП975-ИД	950	53-56	1315	19	-	736	-	950
Сплав	Рабочая температура, °С	МПа	%	МПа, при температуре испытаний, °С				
				700	900	1000	1100	1200
ВЖ172	900	1400	25	620	80	-	-	-
ВЖ159	1000	1150	30	-	70	25	-	-
ВЖ171	1250	850	10	-	-	68	45	23

## 2.2 Литейные жаропрочные сплавы

По сравнению с деформируемыми, литейные сплавы имеют меньшую прочность, пластичность и выносливость. В таблице 4 приведены литейные жаропрочные сплавы.

Таблица 4 – Литейные жаропрочные сплавы

Марка сплава	Разработчик	Тип сплава	Тип структуры
ВЖ172Л	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ12У	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ12Э	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ20	ВИАМ	литейный	направленная
ВЖЛ21	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ22	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ23	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖЛ738	ВИАМ	литейный	равноосная
ВЖМ4	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ5	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ5У	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ6	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ7	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ8	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ВЖМ9	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС26	ВИАМ	литейный	направленная
ЖС26У	ВИАМ	литейный	направленная
ЖС3	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС30	ВИАМ	литейный	направленная



ЖС30М	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС32	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС32У (ВЖМ3)	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС36	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС3ДК	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС40	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС47 (ВЖМ1)	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖС6	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС6К	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС6У	ВИАМ	литейный	равноосная
ЖС6Ф	ВИАМ	литейный	направленная
ЖСКС1	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЖСКС2	ВИАМ	литейный	монокристаллическая
ЭИ698	ВИАМ	литейный	равноосная

**ЖС26УМ, ЖС32У, ЖС36** – экономнолегированные рением жаропрочные никелевые сплавы для сопловых и рабочих лопаток ГТД с направленной и монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1050°С. Сплавы ЖС26УМ и ЖС36 используются в двигателе ПС-90.

**ВЖМ1, ВЖМ5** – высоколегированные рением жаропрочные сплавы для рабочих лопаток ГТД с монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1100°С.

**ВЖМ4, ВЖМ6, ВЖМ8** – рений-рутенийсодержащие жаропрочные никелевые сплавы для рабочих лопаток ГТД, приведенные на рисунке 19, с монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1170°С. Сплав ВЖМ4 внесен в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21 [14].



Рисунок 19 – Двигатель ПД-14

**ВЖЛ21, ВЖМ7** – сплавы нового поколения с низкой плотностью для литья рабочих и сопловых лопаток с поликристаллической (равноосной) структурой (ВЖЛ21) и монокристаллической структурой (ВЖМ7) с рабочими температурами до 1050°C.

**ЖСКС1, ЖСКС2** – коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы для рабочих лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурой для стационарных ГТУ длительного ресурса. Прочностные свойства литейных жаропрочных сплавов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Прочностные свойства литейных жаропрочных сплавов

Сплав	d, кг/ м <sup>3</sup>	$\sigma_{в 20^\circ}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma 100^{900^\circ} /$	$\sigma 100^{1000^\circ} /$	$\sigma 100^{1100^\circ} /$	$\sigma 100^{1150^\circ} /$
				$\sigma 1000^{900^\circ}$	$\sigma 1000^{1000^\circ}$	$\sigma 1000^{1100^\circ}$	$\sigma 1000^{1150^\circ}$
МПа							
ЖС26УМ	8630	969	24	410/245	195/105	90/60	
ЖС32У	8870	1175	15	460/350	265/160	120(79)*/90	
ЖС36	8724	1085	19	480/350	255/160	140/85	
ВЖМ1	9089	1190	21	585/450	330/215	165/95	
ВЖМ5	8790	1090	14	525/	275/	150/	
ВЖМ4	8870	1220	20	575/405	305/200	175/125	125/74
ВЖМ6	8900	1200	16	595/435	315/220	180/130	140/90
ВЖМ8	9060	1405	14,5	-	-	200/140	150/-
ВЖЛ-21	8190	1040	9	345/250	180/110	75/-	
ВЖМ7	8400	1030	20	430/300	220/140	115/90	
ЖСКС1	8200	1135	9	359/238	305/200		
ЖСКС2	8315	1240	13	395/285	200/135		

Рабочие лопатки из жаропрочных сплавов приведены на рисунке 20, интерметаллидные материалы на основе Ni<sub>3</sub>Al представляют интерес для применения в деталях камер сгорания с рабочей температурой до 1300°C, турбин – в качестве сопловых охлаждаемых лопаток, створок регулируемого сопла, проставок с рабочей температурой до 1200°C.

**ВКНА-1В** – сплав предназначен для роторных и сопловых проставок, прошел технологическое и эксплуатационное опробование (с положительным эффектом) в качестве сегментов жаровой трубы с рабочей температурой до 1250°C в течение 2000 ч на двигателях ПС-90А (ОАО «Авиадвигатель») и 117А (ОАО «НПО Сатурн»).

**ВКНА-4У Моно** – сплав прошел технологическое испытание в качестве рабочих лопаток турбины двигателя ТВД-20 для самолетов Ан-3Т и Ан-38-200, эксплуатационное опробование рабочих лопаток с положительным эффектом в течение 5000 ч и 10000 циклов на ОАО «ОМКБ»

(г. Омск); рекомендован для серийного применения в самолете Ил-96 изображенном на рисунке 21.

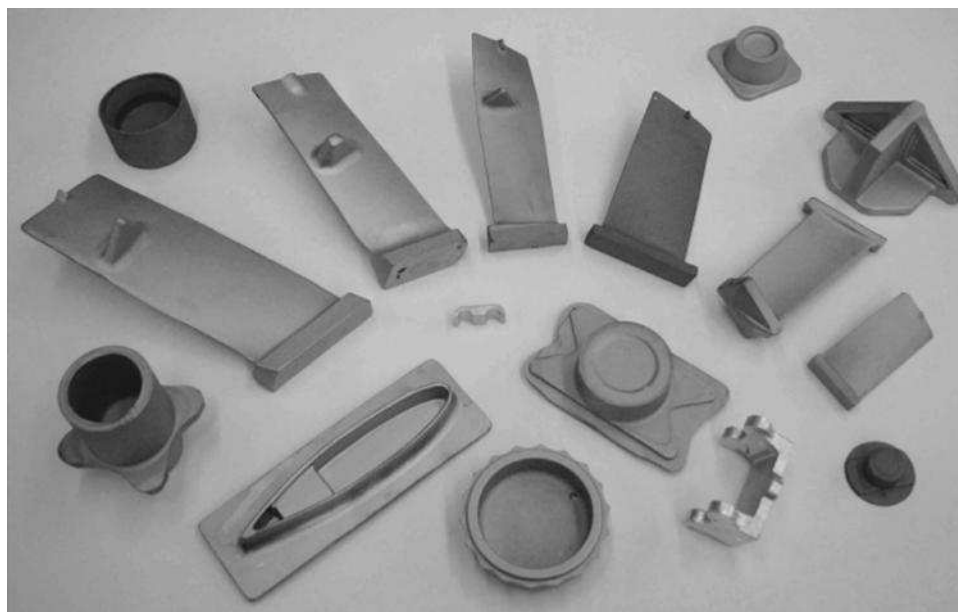


Рисунок 20 – рабочие лопатки из жаропрочных сплавов



Рисунок 21 – самолет Ил-96

**ВКНА-4УР** – сплав прошел технологическое опробование при изготовлении створок регулируемого сопла и блоков сопловых лопаток с положительным эффектом и эксплуатационное опробование в составе двигателя АЛ-31Ф и малогабаритного двигателя МД-120 на предприятии ФГУП "НПЦ Газотурбостроения «Салют»". Сплав внесен в спецификацию



двигателя вертолета ВК-800 ОАО «Климов». Сопловый аппарат двигателя АЛ-31Ф изображен на рисунке 22 [15].



Рисунок 22 – сопловый аппарат двигателя АЛ-31Ф из сплава ВКНА-4УР

**ВКНА-25** – внешний вид двухъярусного блока рабочих лопаток малогабаритного двигателя из сплава ВКНА-25 изображен на рисунке 23. Сплав прошел эксплуатационное опробование с положительным эффектом в составе малогабаритного двигателя МД-120 на предприятии ФГУП "НПЦ Газотурбостроения «Салют»"

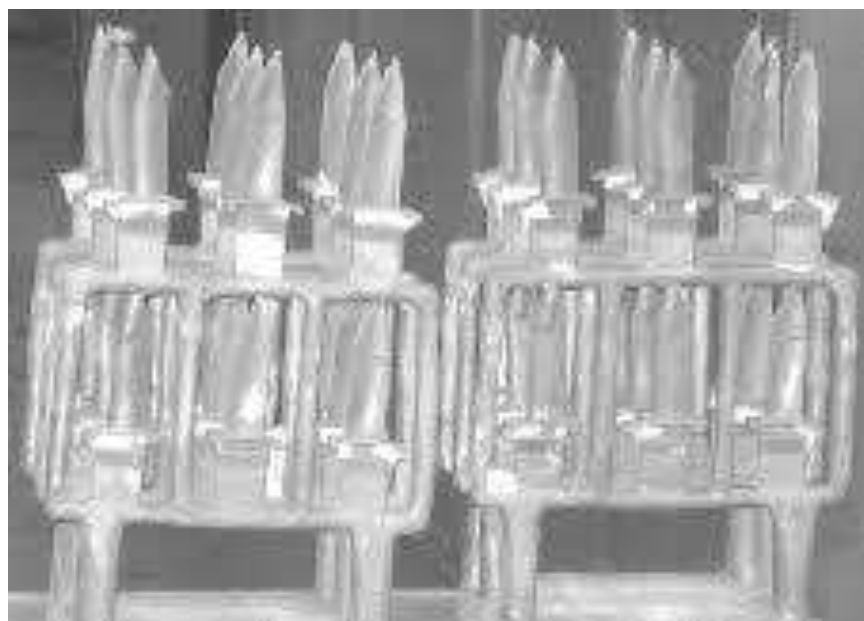


Рисунок 23 – внешний вид двухъярусного блока рабочих лопаток малогабаритного двигателя из сплава ВКНА-25

**ВКНА-1В и ВКНА-4У** – сплавы внесены в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21. Прочностные свойства интерметаллидных сплавов приведены в таблице 6 [5].

Таблица 6 – прочностные свойства интерметаллидных сплавов

Сплав (КГО)	Сумма легирующих элементов (Mo, W, Re, Ta), % (По массе)	d, кг/м <sup>3</sup>	Рабочая температу ра °С	Предел прочнос ти	Жаропрочность на базе 100ч, при температурах		Жаростойкость при температуре, °С	
					$\sigma_{B 20^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ}$ $\sigma_{100}^{1200^\circ}$		
				МПа		1100	1200	
ВКНА-1В	6,5	7938	1250	1350	100	45	10	20
ВКНА-4У	7,2	7910	1200	1340	110	50	6	16
ВКНА-25	9,5	8105	1200	1120	125	48	12,5	20
ВИН2	10,2	8120	1200	1400	100*	-	15	20
ВИН3	13,5	8247	1200	855	82	45	15	-
ВИН4	10	8161	1200	900	90	40	15	20

### **3 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки легированных сплавов на основе железа**

Выплавку такой стали производят в индукционных электрических печах.

Для выплавки высококачественных легированных сплавов на основе железа применяют бессердечниковые индукционные печи, работающие по принципу трансформатора.

Переменный ток, подводимый к индуктору и являющийся первичной обмоткой, индуцирует ток в расплавленном металле, выполняющем роль вторичной обмотки. При этом генерирование тепла происходит непосредственно в металлической шихте, загруженной в тигель внутри индуктора. Это обеспечивает высокий тепловой коэффициент полезного действия и делает индукционные печи наиболее совершенными в теплотехническом отношении агрегатами. Индукционная печь состоит из огнеупорного тигля, окруженного тепловой изоляцией, и находящегося внутри змеевика в виде медной трубки, по которой течет, вода для охлаждения. При прохождении по змеевику переменного тока высокой частоты в металле, находящемся в тигле, образуются вихревые токи большой силы, быстро нагревающие металл до плавления. Вихревые токи энергично перемешивают металл, способствуя этим очищению его от примеси.

Плавка стали в индукционных печах обеспечивает следующие преимущества: быстроту плавки, незначительное окисление шихты, небольшой угар, быстрое получение высоких температур.

Недостатком этих печей является большая стоимость их, а также высокие требования, предъявляемые к стойкости и прочности тиглей, изготовление которых сложно. Все это препятствует широкому внедрению высокочастотных печей. Такие печи применяют только для изготовления наиболее ценных и ответственных сортов сталей [3].

### **Обзор плавильных индукционно-тигельных печей**

Использование ИТП в промышленности обусловлено рядом преимуществ:

- Отсутствие промежуточных нагревательных элементов, то есть выделение энергии непосредственно в загрузке;
- Стабильность свойств получаемого металла;
- Минимальный угар легирующих элементов и металла;
- Интенсивное электродинамическое движение металла в тигле без дополнительного оборудования;
- Простота и удобство обслуживания печи, управления и регулировки процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса;
- Высокая производительность;
- Хорошие условия труда промышленно – производственного персонала, а также малое загрязнение окружающей среды. Наряду с преимуществами своего использования ИТП имеют следующие недостатки: Большие капитальные затраты, особенно для установок, работающих на повышенных и высоких частотах;
- Отсутствие непосредственного нагрева шлака, шлак греется только от расплавляемого металла. Вследствие этого затрудняются процессы рафинирования, а стойкость футеровки относительно невысокая.

Основные элементы ИТП изображены на рисунке 24 - корпус печи, верхняя площадка, полость футеровки сливного носика, стальной шаблон для набивки футеровки тигля, изолирующие подставки секций корпуса, шарнирная опора, штуцеры водоохлаждения индуктора, мост подачи напряжения на индуктор, водоохлаждаемый индуктор, рукоятка аварийного ручного наклона, редуктор наклона.



Рисунок 24 – Основные элементы индукционно-тигельной печи фирмы «Inductotherm Group»

Наиболее широко применяются открытые ИТП средней частоты для плавки стали ёмкостью до 2,5 т при мощности до 2,5 МВт. В зависимости от вместимости ИТП работают в частотном диапазоне 0,15 ÷ 10 кГц. С увеличением частоты при том же токе, в индукторе возрастает мощность ИТП.

Источниками питания средней частоты для тигельных печей являются статические (тиристорные и транзисторные) преобразователи частоты. Для питания индукционных установок большой мощности (свыше 250 кВт) широкое распространение находят тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ).

Коэффициент мощности у ИТП относительно низок (обычно 0,03 – 0,15 в зависимости от частоты) и изменяется в ходе плавки, по этой причине для компенсации реактивной мощности используются конденсаторные батареи с регулируемой ёмкостью.

Технические характеристики некоторых типов открытых и вакуумных ИТП, выпускаемых в нашей стране для плавки стали (тип ИСТ и ИСВ),

раннее разработанные во «ВНИИЭТО», приведены в таблице 7. Технические характеристики ТПЧ производства «РЭЛТЕК» приведены в таблице 8, а также технические характеристики ППЧ производства «Курай» приведены в таблице 9.

Таблица 7 – Технические данные открытых индукционных тигельных печей для плавки стали разработки «ВНИИЭТО»

Назначение, тип печи	Вместимость $G$ , т	Мощность источника питания $P$ , кВт	Частота $f$ , Гц	Напряжение на индукторе $U$ , В	Удельный расход электроэнергии $P_{уд}$ , кВт·ч/т
Плавка стали, ИСТ	0,06	50	2400	1000	730
	0,16	100	2400	1000	695
	1	800	1000	1000	625
	2,5	2400	500	2000	747
Вакуумная плавка стали в печи периодического действия ИСВ	0,06	155	2400	800	2500
	0,16	357	2400	800	2170
	0,16	435	2400	800	2100
	1	1000	1000	1000	2000
	2,5	2500	1000	1000	2000

Рассмотрены особенности конструкций ИТП, производимых фирмами: «РЭЛТЕК» (Екатеринбург), «Индуктор» (Новозыбков), «АВР» (Германия), «EGES» (Турция), «OTTO JUNKER» (Германия), «ULVAC» (Япония).



Таблица 8 – Данные ИТП производства «РЭЛТЕК»

Тип	Вместимость $G$ , т	$P_{\text{вых}}$ кВт	$f_{\text{вых}}$ кГц	Удельная мощность $P_{\text{уд}}$ , кВт · ч / т	Время плавки $t$ , ч
ИСТ– 0,06/0,12	0,06	100	2,4	910	0,75
ИСТ– 0,1/0,16	0,1	180	2,4	910	1
ИСТ– 0,16/0,16	0,16	160	2,4	700	1,15
ИСТ– 0,25/0,32	0,25	320	1,0	700	1,15
ИСТ– 0,4/0,32	0,4	320	1,0	700	1,15
ИСТ– 0,6/0,63	0,6	630	1,0	648	1
ИСТ– 0,6/0,8	0,6	699	1,0	600	0,8
ИСТ–1,0/0,5	1,0	500	1,0	700	1,26
ИСТ–1,0/0,8	1,0	800	1,0	607	1,15
ИСТ– 2,5/1,6	2,5	1600	0,5	910	1,2
ИСТ– 6 / 2,4	6	2400	0,5	–	2,5

Таблица 9 – Технические данные ТПЧ производства «Курай»

Обозначение	Мощность $P$ , кВт	Частота $f$ , кГц	Вых. напряжение $U$ , В	КПД $\eta$
ППЧ-250-1	250	1	800	0,9
ППЧ-250-2, 4	250	2,4	400/800	0,9
ППЧ-250-8	250	8	250/400/800	0,85
ППЧ-320-1	320	1	800	0,9
ППЧ-320-2, 4	320	2,4	800	0,9
ППЧ-320-8	320	8	250/400/800	0,85
ППЧ-400-2, 4	400	2,4	800	0,9
ППЧ-500-1, 0	500	1,0	800	0,9
ППЧ-800-0, 5	800	0,5	800/1600	0,9

Технические данные некоторых типов зарубежных ИТП, а также преобразователей частоты производства «EGES» представлены в таблице 10. Технические данные ИТП производства «OTTO JUNKER» представлены в таблице 11.

Таблица 10 – Данные ИТП и ТПЧ производства «EGES»

<b>Печь</b>		<b>Преобразователь</b>	
<b>Модель</b>	<b>Вместимость <math>G</math>, (кг)</b>	<b>Мощность <math>P</math> (кВт)</b>	<b>Частота <math>f</math>, (Гц)</b>
EGP 100	100	100	1500/2000
EGP 200	200	150	1500/2000
EGP 300	300	200	1500/2000
EGP 350	350	250	1500/2000
500 Eco	500	350	1000/2000
750 Eco	750	450	1000/2000
1000 Eco	1000	600	1000
1500 Eco	1500	800	500
1500 Eco	1500	1000	500
2000 Eco	2000	1000	500
2000 Eco	2000	1250	500
2000 Eco	2000	1500	500
2500 Eco	2500	1900	500

Таблица 11 – Данные ИТП производства «OTTO JUNKER»

<b>Вместимость <math>G</math>, кг</b>	<b>Мощность <math>P</math>, кВт</b>	<b>Скорость плавки <math>q</math>, (кг/ч)</b>
500	500	950
750	750	1400
1000	1000	1900
1500	1500	2850
2000	2000	4000

Исходя из данных произведенных в таблицах 7 – 11 видно, что:

- ИТП для плавки стали питаются от источников питания средней частоты для повышения удельной поверхностной мощности в загрузке;
- Удельная мощность сталеплавильных ИТП в среднем составляет около 1 кВт/кг.;
- Диапазон частот питания ИТП составляет в среднем от 0,5 до 8 кГц.

Основное направление в развитии индукционного ЭТК заключается в повышении производительности и выпуска большего количества металла.

Современный подход к использованию ИТП как высокоэффективного, а, следовательно, и экономичного плавильного агрегата, предполагает управление тепловым и электрическим режимами на всех стадиях плавки с целью сокращения времени плавки.

Особенности плавки стали, характерные для ИТП: непосредственный разогрев загрузки с выделением энергии в её объёме, интенсивное перемешивание металла, высокий к.п.д., относительно малый расход электроэнергии на тонну выплавляемого металла.

Повышение производительности ИТП произошло при увеличении частоты питания от 50 до 500 Гц для крупных печей. При уменьшении размеров печи оптимальная частота увеличивается в пределах 1,0 – 10,0 кГц для печей вместимостью 10-400 кг. Для малых печей вместимостью меньше 1 кг оптимальная частота возрастает до 440 кГц.

Отмечается, что учёт времени технологических операций при проведении плавки для заданной производительности позволяет выбирать необходимую мощность и частоту источника питания ИТП в соответствии с её габаритами. Для сталеплавильных установок с ёмкостью загрузки свыше 1 тонны требуются: 1 час на плавку, 30 минут на очистку, рафинирование и корректировку, 30 минут на разливку и загрузку шихты. Зависимости времени плавки, от параметров ИТП, приведены на рисунке 25, где изображены зависимости минимального времени плавки и ёмкости тигля при производительности 1 т/ч по стали (1 – при средней интенсивности перемешивания, 2 – при высокой), от частоты. Такой выбор эксплуатационных параметров ИТП экономически оправдан.

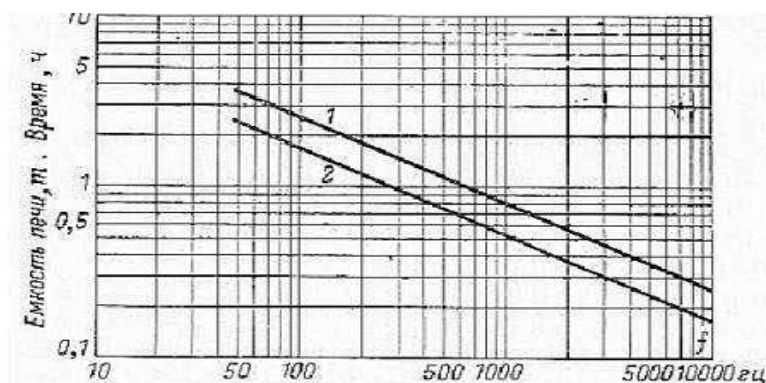


Рисунок 25 – минимальные время плавки и ёмкость печи при производительности 1т/ч в функции рабочей частоты

Плавильные печи компании АВР. Компании ASEA и ВВС являлись практически единственными зарубежными поставщиками индукционных плавильных печей на рынок Советского Союза. Их оборудованием оснащены крупнейшие литейные производства. В 1971 г. ВВС продает лицензию на



производство крупнотоннажных индукционных печей промышленной частоты Министерству электротехнической промышленности СССР.

В постсоветский период компанией АВВ – АВР в Россию поставлено более 30-ти среднечастотных плавильных комплексов емкостью от 1т до 30т с единичной мощностью преобразователей до 12000 кВт.

Для плавки черных металлов, компания АВР Induction предлагает приведенные ниже серии среднечастотных индукционных тигельных печей, в максимальной степени, приспособленные для различных применений и производственных требований:

- Серии Smart FS и FS – емкостью от 250 кг до 6000 кг с источниками питания мощностью от 250 кВт до 4800кВт

- Серия IFM – высокопроизводительные индукционные тигельные печи емкостью от 6т до 37т мощностью до 16000 кВт

- Крупнотоннажные индукционные тигельные печи емкостью 20 – 60 т мощностью до 17000 кВт. [17].

Плавильные печи компании Inductotherm. Компания является крупнейшим в мире изготовителем индукционного плавильного и нагревательного оборудования. Inductotherm Corp. имеет более чем 50-летнюю историю, производит и продает оборудования больше, чем все конкуренты в мире вместе взятые, например: более 60 % рынка индукционных печей в Германии принадлежит Inductotherm Corp.

Заводы Inductotherm Corp. по производству оборудования расположены в 14 странах мира. По всему миру установлено более 16000 единиц оборудования Inductotherm Group [16].

#### **4 Способы изготовления форм для получения отливок из жаропрочных сплавов**

Для изготовления отливок применяют множество способов литья:

- в песчаные формы;
- по выплавляемым моделям;
- в кокиль;
- под давлением;
- центробежное литьё и т.д.

Область применения того или иного способа литья определяется объёмом производства, требованиями к геометрической точности шероховатости поверхности отливки, экономической целесообразностью и другими факторами.

Классификация литых заготовок:

По условиям эксплуатации независимо от способа изготовления различают отливки:

- группа общего назначения – для деталей, не рассчитываемых на прочность. Конфигурация и размеры их определяются только конструктивными технологическими соображениями;
- группа ответственного назначения составляет отливки для изготовления деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при циклических и динамических нагрузках;
- группа отливок особо ответственного назначения использует для изготовления деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при циклических и динамических нагрузках.

Разнообразие выпускаемого литья вызывает необходимость применения различных форм, отличающихся технологией изготовления и исходными материалами.

Для изготовления отливок из легированных сталей массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов, как правило, используется литьё по выплавляемым моделям [9].

## **5 Литье по выплавляемым моделям**

Сущность литья по выплавляемым моделям сводится к изготовлению отливок, заливкой расплавленного металла в разовую, тонкостенную, неразъёмную литейную форму. Изготовленную из жидкоподвижной огнеупорной суспензии по моделям разового использования (разовые выплавляемые модели изготавливают из легкоплавких компонентов - парафина, воска, жирных кислот и других химических веществ) с последующим затвердеванием залитого металла, охлаждением отливки в форме и извлечение её из формы.

Последовательность операций процесса литья по выплавляемым моделям представлена на рисунке 26.

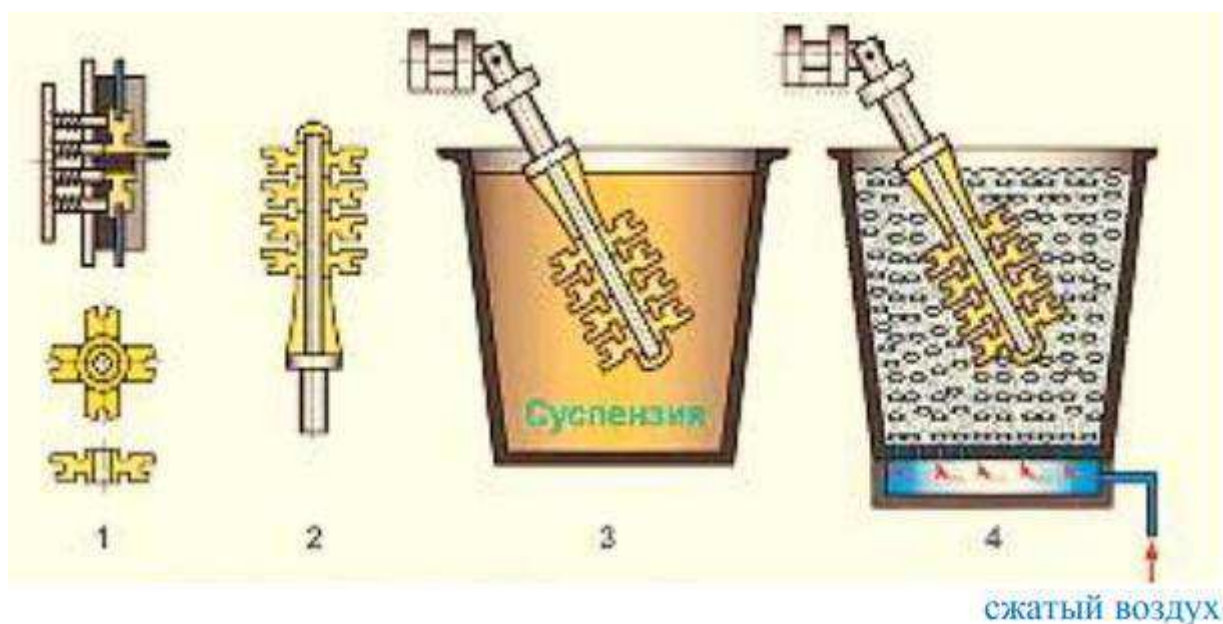


Рисунок 26 – Последовательность операций процесса литья по выплавляемым моделям

- 1 – изготовление моделей в пресс-форме;
- 2 – сбор моделей в модельный блок на металлический стояк;
- 3 – нанесение на модельный блок огнеупорной суспензии;
- 4 - обсыпка слоя суспензии зернистым материалом в кипящем слое.

Отличительными особенностями литья по выплавляемым моделям являются низкая теплопроводность и высокая начальная температура формы, что значительно снижает скорость отвода теплоты от залитого металла и способствует улучшению наполняемости полости формы, но одновременно приводит к укрупнению кристаллического строения и к появлению усадочных раковин и пористости в стенках толщиной 6 – 8 мм. Керамическая суспензия позволяет точно воспроизвести контуры модели, а образование неразъемной литейной формы с малой шероховатостью поверхности способствует получению отливок с высокой точностью геометрических размеров и тоже с малой шероховатостью поверхности, что значительно снижает объем механической обработки отливок. Припуск на механическую обработку составляет 0,2 – 0,7 мм. Заливка расплавленного металла в горячие формы позволяет получать сложные по конфигурации отливки с толщиной стенки 1 – 3 мм и массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов из жаропрочных труднообрабатываемых сплавов (турбинные лопатки), коррозионностойких сталей (колеса для насосов), углеродистых сталей в массовом производстве (в авто - и приборостроении, других отраслях машиностроения). Отливки, изготовленные методом литья по выплавляемым моделям, изображены на рисунке 27 [10].



Рисунок 27 – Отливки полученные методом литья по выплавляемым моделям

## 6 Разработка технологии производства отливок из сплава 20X5МЛ

Целью моей работы является разработка технологии производства отливок из стали мартенситного класса (ГОСТ 977-88), используемой для таких деталей, как:

- детали арматуры нефтеперерабатывающих установок;
- печные двойники;
- корпуса насосов и другие детали, работающие в нефтяных средах под давлением при температуре до 600°C.

В таблице 12 приведен химический состав стали 20X5МЛ.

Таблица 12 – Химический состав в % стали 20X5МЛ

Элемент	Количество
C	0,15-0,25
Si	0,35 – 0,70
Mn	0,4–0,6
Mo	0,4-0,65
S	до 0,04
P	до 0,04
Cr	4 – 6,5
Fe	остаток

Зарубежные аналоги марки стали 20X5МЛ

Япония: JIS SCPH61

Англия: BS 625

Италия: UNI GX15CrMo5

Франция: AFNOR Z15CD505M

Чехия: CSN 42277

Удельный вес: 7730 кг/м<sup>3</sup>

Термообработка: Отжиг 950°С, Отпуск 680 - 720°С

Свариваемость материала: РД, РАД и КТ

Флокеночувствительность: не чувствительна.

Склонность к отпускной хрупкости: не склонна.

Обрабатываемость резанием: К υ тв. спл=03

Линейная усадка, %: 2.7 [2].

### 6.1 Характеристика отливки

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрена отливка – колесо компрессора, из сплава 20Х5МЛ, изображенная на рисунке 28.

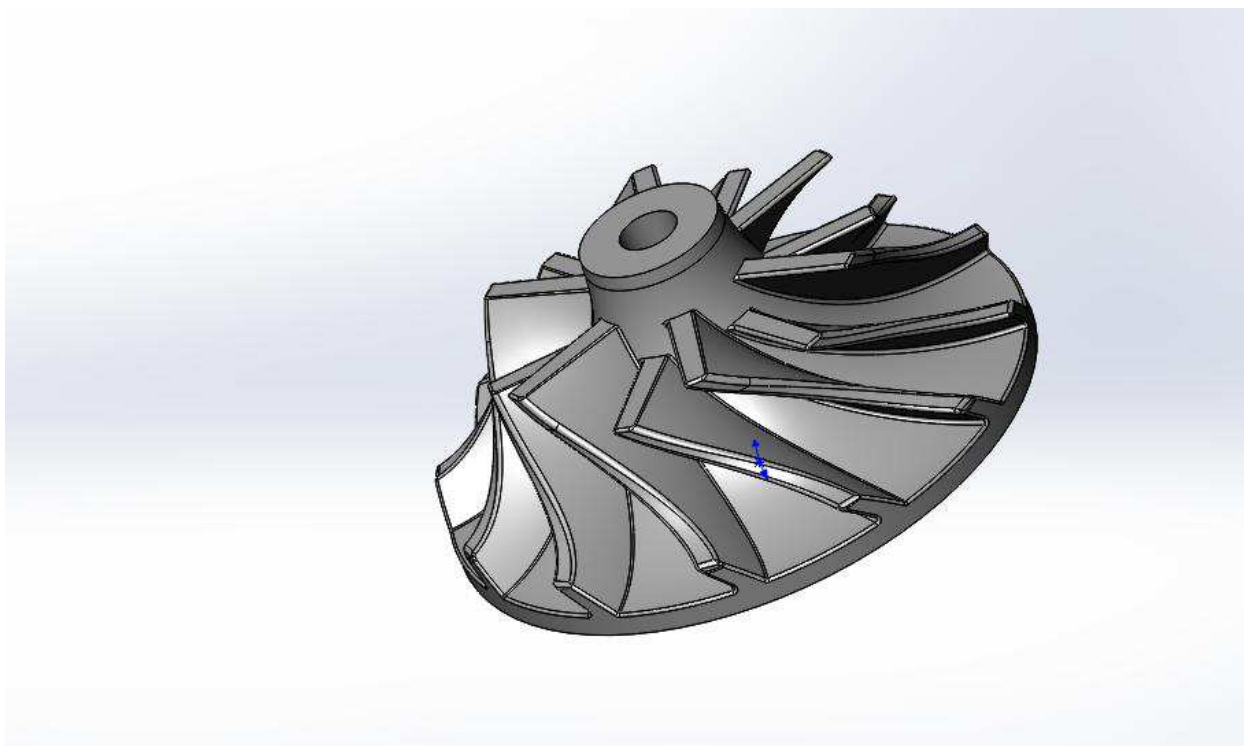


Рисунок 28 – Колесо компрессора

Компрессор представляет собой механизм, который повышает давление рабочей текучей среды, например, газа, посредством использования механической энергии. Компрессоры используются в разных областях применения, включая их работу в качестве начальной ступени газотурбинного двигателя. Среди разных типов компрессоров, существуют так называемые центробежные компрессоры, рабочая среда которых на впуске в компрессор получает механическую энергию, обеспечивающую центробежное ускорение. В частности, можно сказать, что центробежные компрессоры относятся к классу механизмов, известных под названием

«турбомеханизмы» или «турбомашин». Центробежные компрессоры могут иметь только одно рабочее колесо, то есть, имеют одноступенчатую конфигурацию, либо несколько установленных последовательно рабочих колес, при этом в последнем случае компрессоры называют многоступенчатыми. Каждая из ступеней центробежного компрессора обычно включает в себя: впускной канал для протекания рабочей текучей среды, рабочее колесо и диффузор, преобразующий кинетическую энергию рабочей текучей среды, вытекающей из ротора, в энергию давления [6].

Чертеж детали представлен на рисунке 29. Деталь изготовлена из стали, марки 20Х5МЛ.

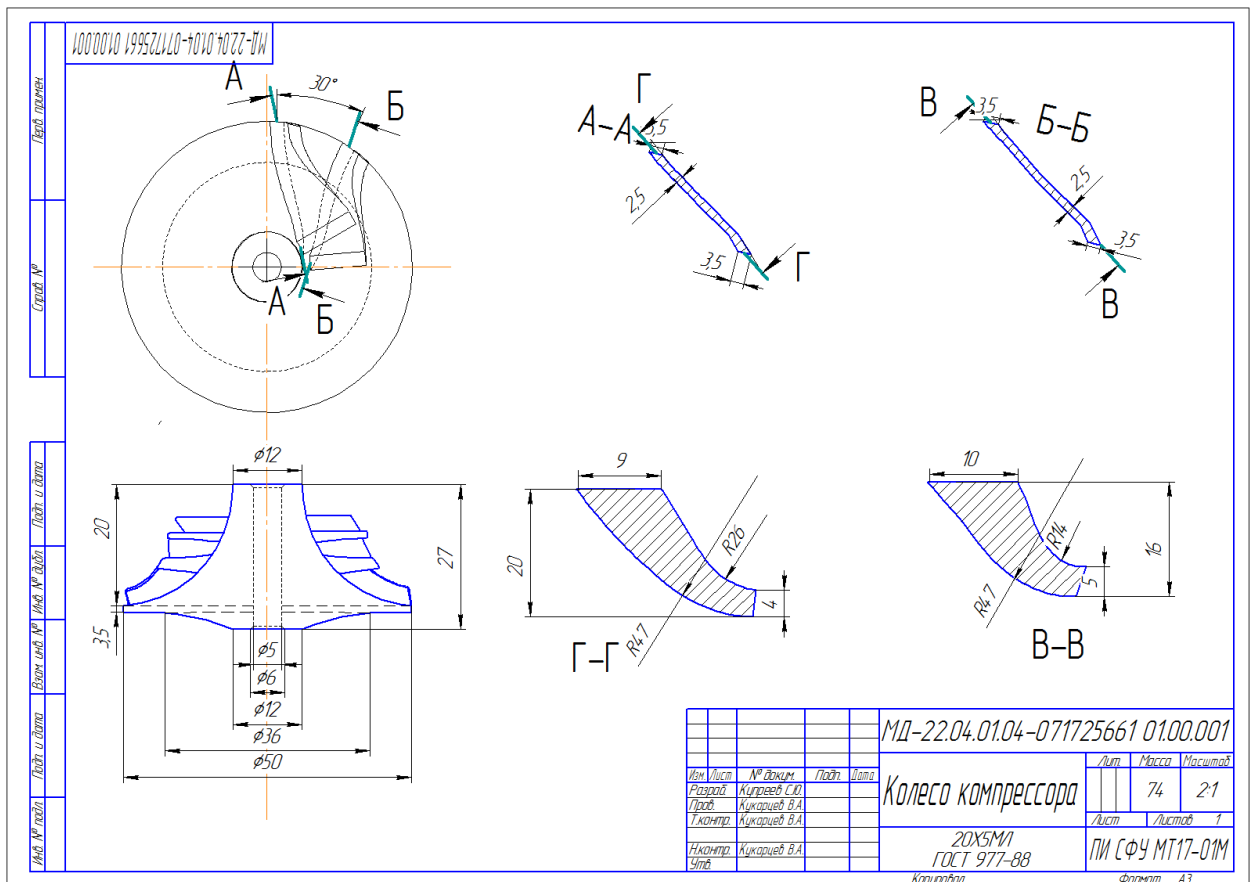


Рисунок 29 – Чертеж детали

Мною разработан чертёж отливки, который представлен на рисунке 30.

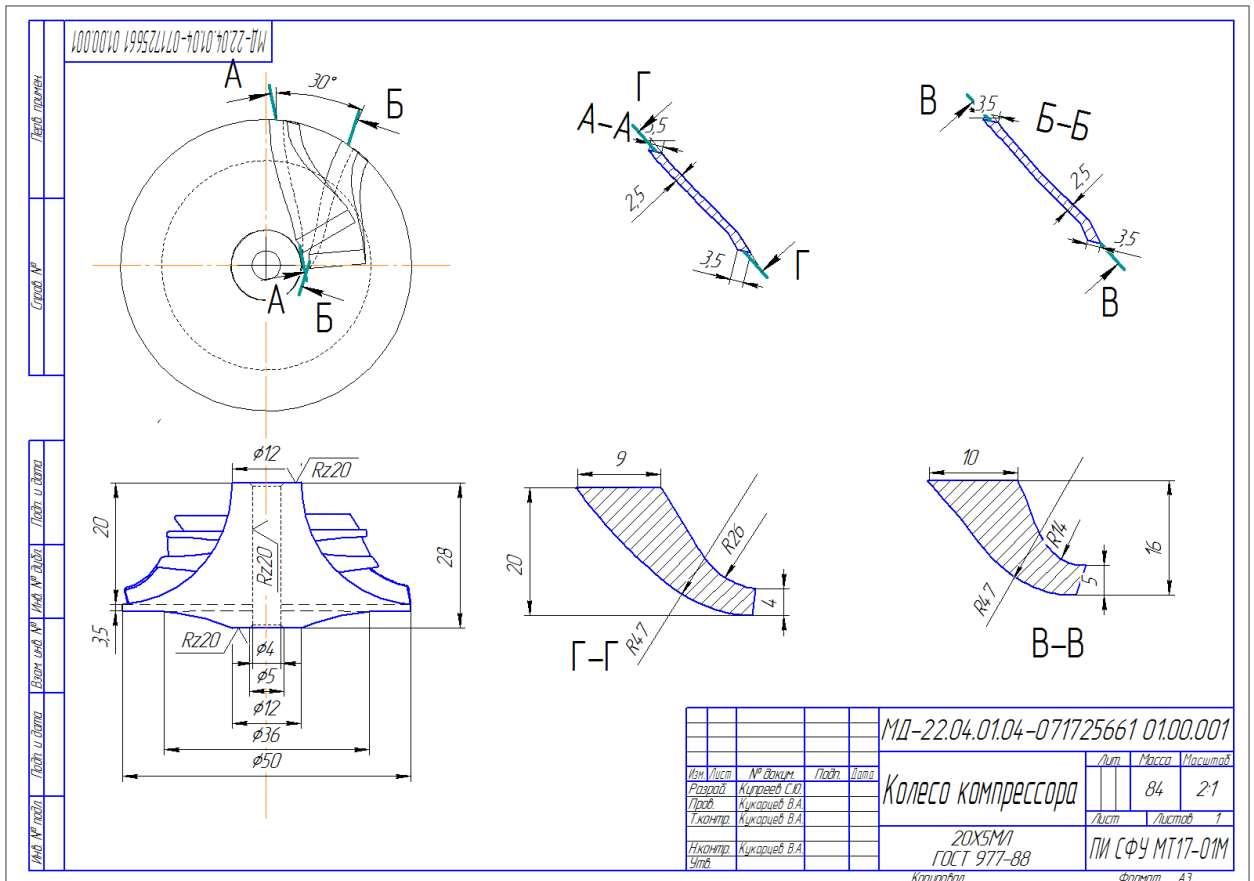


Рисунок 30 – Чертеж отливки

## 6.2 Обоснование выбора способа изготовления отливки

Литье по выплавляемым моделям – метод получения отливок в неразъемных разовых формах, преимущественно оболочковых, обладающих повышенной точностью ГОСТ 26645-85.

Изготавливая данную отливку методом ЛВМ, мы сможем максимально приблизить отливку по форме и размерам к готовой детали, а в ряде случаев получить литую деталь, дополнительная обработка которой перед сборкой не требуется. Вследствие этого резко снижаются трудоемкость и стоимость изготовления изделий, уменьшается расход металла и инструмента, экономятся энергетические ресурсы, сокращается потребность в рабочих высокой квалификации, в оборудовании, приспособлениях, производственных площадях. Метод позволяет изготавливать сложные тонкостенные отливки. Так же мы можем изготовить отверстия литьем, без применения стержней. Метод позволяет получать отливки с высокой точностью и хорошим качеством поверхности, что необходимо при изготовлении данной отливки «Колесо компрессора».

Применение высокоогнеупорных и термостойких материалов для изготовления оболочковых форм, пригодных для нагрева до температуры выше температуры плавления литейного сплава и быстрого охлаждения без



деформаций и разрушений, позволяет эффективно использовать методы направленной кристаллизации, получать высоко герметичные отливки и получать монокристаллические изделия.

### **6.3 Выбор и обоснование конструкции литниково-питающей системы**

ЛПС при литье по выплавляемым моделям строят из традиционных элементов: литниковых воронок, стояков, зумпфов и литниковых ходов, прибылей и коллекторов. Благодаря, характерной для литья по выплавляемым моделям, неразъемной форме указанные конструктивные элементы удается расположить наиболее эффективно, максимально используя объем формы.

Для отливки «Колесо компрессора» лучше всего будет использовать литниково-питающую систему 1-го типа, где питающий элемент – центральный стояк. ЛПС этого типа представляет собой стояк компактного сечения, непосредственно к которому с разных сторон присоединяются небольшие отливки с индивидуальными питателями. Центральный стояк является одновременно и литниковым ходом, и коллективной прибылью, а питатели соответственно выполняют и роль шеек прибылей. Сечение стояка имеет форму круга. Центральное расположение стояка обуславливает естественное замедление его охлаждения и способствует направленному затвердеванию периферийно расположенных отливок. Зумпф в нижней части стояка смягчает отрицательное действие механического и теплового ударов, имеющих место в начальный момент заливки.

Центральный стояк служит основой для создания комплексно-механизированного технологического процесса производства небольших отливок. Применение унифицированного металлического каркаса в качестве несущей конструкции обеспечивает удобство звеньевой сборки модельного блока и его высокую прочность при изготовлении оболочковой формы. Уже в отлитом блоке центральный стояк надежно закрепляется в приспособлениях станков при очистке и отрезке отливок.

### **6.4 Расчет элементов литниково-питающей системы**

Расчет размеров элементов литниково-питающих систем в случае, когда требуется получить плотные отливки с повышенными механическими свойствами, рекомендуется производить по методике, разработанной М.Л. Хенкиным на основе обширных экспериментальных исследований. Данная

методика может быть использована для расчета элементов ЛПС 1 – 3, 7 типов.

Методика предусматривает подвод металла к наиболее массивным узлам отливки.

Исходными данными для определения размеров элементов литниково-питающей системы является приведенная толщина массива отливки (узла питания) и масса отливки.

Модуль охлаждения сечения питателя (отношение площади сечения питателя к его периметру) определяют по эмпирической формуле:

$$\delta_{\text{п}} = 2^4 \sqrt{\delta_0^3 G^3 l_{\text{п}}} / \delta_{\text{ст}}$$

где  $\delta_0$  – модуль охлаждения отливки или ее массивного узла;

$G$  – масса отливки, г.;

$l_{\text{п}}$  – длина питателя, мм.;

$\delta_{\text{ст}}$  – модуль охлаждения сечения стояка (отношение площади сечения стояка к его периметру);

$$\delta_{\text{ст}} = 2^4 \sqrt{\delta_0^3 G^3 l_{\text{п}}} / \delta_{\text{п}}$$

В представленных формулах отражена зависимость между размерами ЛПС и отливки, а также размерами элементов ЛПС через модули охлаждения  $\delta_{\text{ст}}$ ,  $\delta_0$ ,  $\delta_{\text{п}}$  массу отливки  $G$ .

Для получения качественных отливок должно выполняться следующее условие:  $\delta_{\text{ст}} > \delta_{\text{п}} > \delta_0$ , так как при этом обеспечивается направленное затвердевание от отливки к стояку и питание отливки.

По приведенным формулам рассчитывались размеры ЛПС для большого числа стальных отливок. Данные расчета после производственной проверки сведены в таблицы. По заданной массе отливки, известной по чертежу, определяют  $\delta_0$  и выбирают значение  $l_{\text{п}}$  из условий сборки блоков моделей и отрезки отливок. В среднем при  $G < 0,5$  кг длина  $l_{\text{п}} = 4 \dots 10$  мм, при  $0,5 < G < 1,5$  кг длина  $l_{\text{п}} = 8 \dots 12$  мм. Затем по таблице пользуясь известными  $G$  и  $\delta_0$ , находят диаметр стояка  $D_{\text{ст}}$  и размеры питателя. В разностенных отливках с массивными частями модуль охлаждения  $\delta_0$  можно рассчитывать только по размерам массивной части, примыкающей к питателю. Если рассчитанное значение  $D_{\text{ст}} > 60$  мм, то применяют литниковую систему с коллекторами, которые выполняют функцию питающих элементов литниково-питающей системы [24].

По формуле 1 рассчитаны размеры литниковых систем для значительного количества стальных отливок. Полученные данные после производственной проверки сведены в таблицу 13, которые позволяют определить размеры элементов литниково-питающих систем, не прибегая к расчетам.

Необходимо рассчитать размеры элементов литниково-питающей системы для отливки «Колесо компрессора». Материал – жаропрочная сталь 20Х5МЛ. Масса отливки  $G = 84\text{г}$ .

Таблица 13 – размеры литниково-питающих систем для значительного количества стальных отливок изготовляемых литьем по выплавляемым

G, г	Характеризуемый параметр	Значения параметра в зависимости от приведенной толщины узла отливки $\delta_0$ , мм										
		1,1	1,8	2,5	3,0	3,5	3,9	4,2	4,6	5,1	5,8	6,7
50	$D_{ст}$ , мм	20	20	25	25	30	–	–	–	–	–	–
	$\delta_{п}$ , мм:											
	при $l_{п} = 4$ мм	1,75	2,50	2,50	3,00	3,00	–	–	–	–	–	–
	при $l_{п} = 8$ мм	2,00	3,00	3,20	3,50	3,75	–	–	–	–	–	–
50...100	$D_{ст}$ , мм	20	20	25	30	30	30	30	35	–	–	–
	$\delta_{п}$ , мм:											
	при $l_{п} = 4$ мм	2,00	2,75	3,00	3,50	3,75	4,0	4,5	–	–	–	–
	при $l_{п} = 8$ мм	2,50	3,50	3,75	3,50	4,30	4,75	5,0	4,5	–	–	–
100...200	$D_{ст}$ , мм	20	25	30	30	35	35	40	40	40	45	45
	$\delta_{п}$ , мм:											
	при $l_{п} = 4$ мм	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75	4,0	4,95	4,5	4,5	5,0
	при $l_{п} = 8$ мм	3,0	3,5	3,75	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	5,5	5,75	6,25

моделям

Приведенная толщина массивного узла отливки 3 мм.

Принимаем длину питателя  $l = 8$  мм для удобной отрезки дисковой фрезой.

Для  $G = 84$  г;  $\delta_0 = 3$  мм;  $l = 8$  мм; по таблице находим  $D_{ст} = 30$  мм.

Находим приведенные толщины питателя:

$\delta_{п} = 3,5$  мм. В нашем случае используется кольцевой питатель, для которого исходя из полученных величин, определим линейные размеры питателя:

$$L_{п} = 8\text{мм};$$

$$D_{вн} = 12\text{ мм};$$

$$D_{внут} = 6\text{ мм}.$$

## 6.5 Разработка схемы модельного блока с элементами литниково-питающей системы

По заданному чертежу отливки, изображенном на рисунке 30 и расчетам элементов литниково-питающей системы, была разработана схема модельного блока с элементами литниково-питающей системы изображенная на рисунке 31.

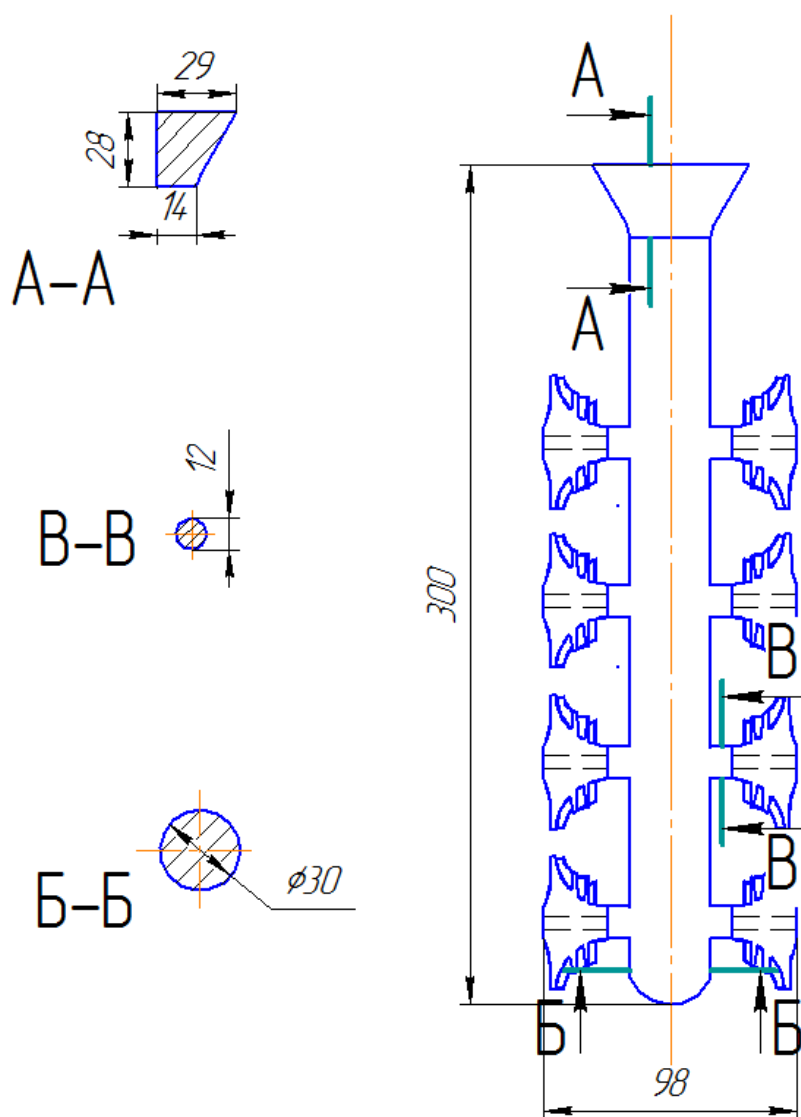


Рисунок 31 – Схема модельного блока с элементами литниково-питающей системы

## 7 Построение 3D модели в САПР SolidWorks

По заданной схеме модельного блока с элементами литниково-питающей системы, изображенной на рисунке 31, в системе автоматического проектирования SolidWorks построена 3D модель блока с элементами литниково-питающей системы, представленная на рисунках 33, 34, 35.

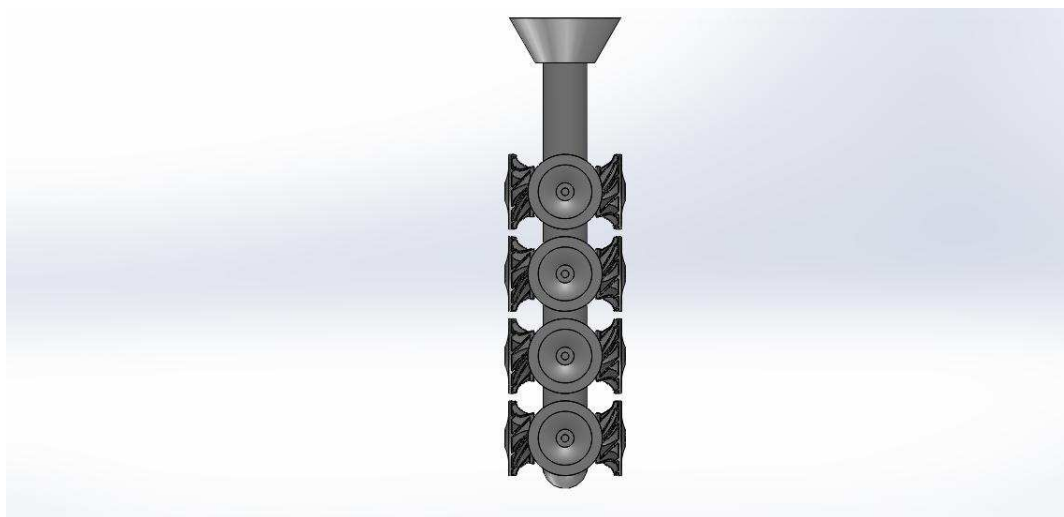


Рисунок 33 – 3D модель блока с элементами литниково-питающей системы (Вид спереди)

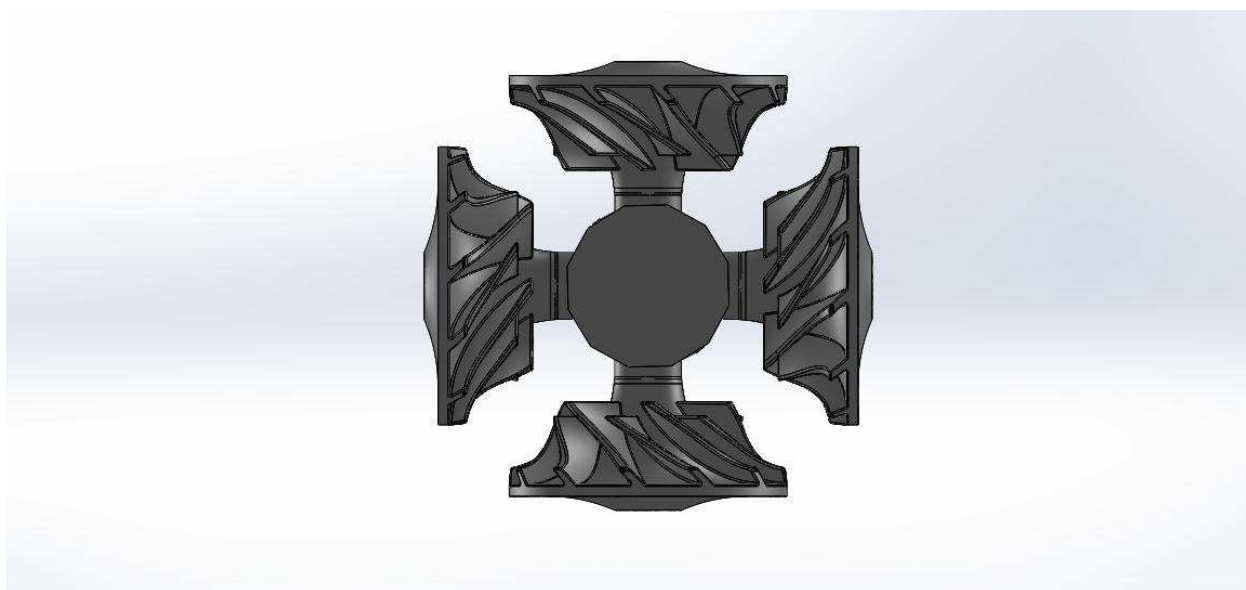


Рисунок 34 – 3D модель блока с элементами литниково-питающей системы (Вид сверху)



Рисунок 35 – 3D модель блока с элементами литниково-питающей системы (Изометрия)

Металлоемкость данной отливки составляет:

$$G = G_{ст} + (G_o * 16)$$

$$G_o = 16 * 84 = 1344 \text{ гр.}$$

$$G_{ст} = 2731 \text{ гр.}$$

$$G = 4075 \text{ гр.}$$

Технологический выход годного:

$$\eta = \frac{G_o}{G} * 100 \%, \quad (4)$$

$$\eta = 1344 / 4075 * 100 = 32.98\%.$$

Время заполнения отливки найдем по формуле:

$$\tau = \rho \sqrt[3]{\delta * G},$$

Принимаем по таблице 14 значения коэффициента  $S = 1,5$ .

Таблица 14 – Опытные величины коэффициента  $S$  для стальных отливок

Подвод металла	Нормальная температура заливки и жидкотекучесть	Повышенная температура заливки и жидкотекучесть

Сифоном или в толстостенные части отливок	1,3	1,4–1,5
Сбоку или ступенчато	1,4	1,5–1,6
Сверху или равномерно тонкостенные части отливки	1,5–1,6	1,6–1,8

Толщина стенки стояка= 30 мм, металлоемкость отливки  $G = 4.075$  кг.

Тогда:

$$\tau = 1,5 \sqrt[3]{(30 * 4.075)} = 7.5 \text{ с.}$$

Высота отливки вместе:

$$C = 300 \text{ мм.}$$

Скорость подъема металла в форме:

$$V = \frac{C}{\tau},$$

$$V = \frac{300}{7.5} = 40 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

## 8 Моделирование литейных процессов в программе LVMflow

Для определения правильности разработанной литниковой-питающей системы применяем программу моделирования LVMflow.

Применение LVMFlowCV позволяет:

- оптимизировать режимы заливки сплава и затвердевания отливки;
- оптимизировать литниковую систему.
- анализировать процессы литья при использовании различных материалов (углеродистые стали; легированные стали; чугуны серые, белые, ковкие и высокопрочные; алюминиевые, титановые, бронзовые, магниевые сплавы, а также сплавы на никелевой и медной основе и др.)



Также LVMFlowCV существенно ускоряет исследовательскую работу по проектированию отливок, обеспечивая хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

Анализ технологического процесса изготовления отливок в системе компьютерного моделирования литейных процессов LVMFlow состоит из следующих приемов и этапов:

1. Конвертация геометрии отливки в формат LVMFlow.
2. Создание расчетной конечно-объемной сетки.
3. Задание свойств материалов.
4. Задание предельных условий.
5. Проведение расчета температурных полей.
6. Контроль изменений расчетных параметров.
7. Расчет напряжений и деформаций в отливке.

Компьютерное моделирование разрешает проследить все процессы, которые происходят в металле при заполнении формы, затвердевании и возникновении усадочных дефектов.

В LVMFlow есть три расчетных модуля: «Кристаллизация», «Моделирование течения расплава», «Полная задача».

В модуле «Кристаллизация» форма сначала считается мгновенно заполненной расплавом и моделируется процесс затвердевания сплава. В основе модели лежит неравновесная теория кристаллизации многокомпонентного сплава.

В модуле «Моделирование течения расплава» моделируется заполнение формы расплавом, которое рассматривается как течение идеальной жидкости без учета процессов теплопередачи.

Одновременное моделирование процессов заполнения формы расплавом и его затвердевания осуществляется в модуле «Полная задача».

По механизму образования выделяют два типа усадочных дефектов: 1) раковины (макропористость) и 2) микропористость.

Макропористость образуется при недостатке питания выше зеркала расплава, когда отсутствует необходимый его объем для компенсации усадки. Для прогнозирования макропористости моделируется возникновение и движение зеркала расплава. Перемещение зеркала обусловлено объемной усадкой, а его возникновение происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов расплава.

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала в области теоретически достаточного питания. Падение давления в глубине зоны с формально хорошими условиями питания происходит по следующим причинам: большая объемная усадка, затрудненное движение жидкого

металла в твердо-жидкой зоне, изоляция от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления.

Для выполнения этапа предварительного моделирования в программе SolidWorks было создано несколько вариантов отливок, чтобы на стадии моделирования проверить, какой из вариантов (размещения отливок в форме, технологических факторов) является наиболее подходящим.

После разработки модели отливки в программе SolidWorks, производится моделирование заливки формы, в программе LVMflow, где задаются все необходимые параметры для выполнения расчета [21].

Параметры заливки металла при всех исследованиях одинаковые:

- температура заливки металла = 1580;
- температура окружающей среды = 20;
- прогрев формы перед заливкой до 800 градусов;
- керамическая оболочка толщиной 4mm.

Результаты моделирования представлены на рисунке 36.

### Исследование №1

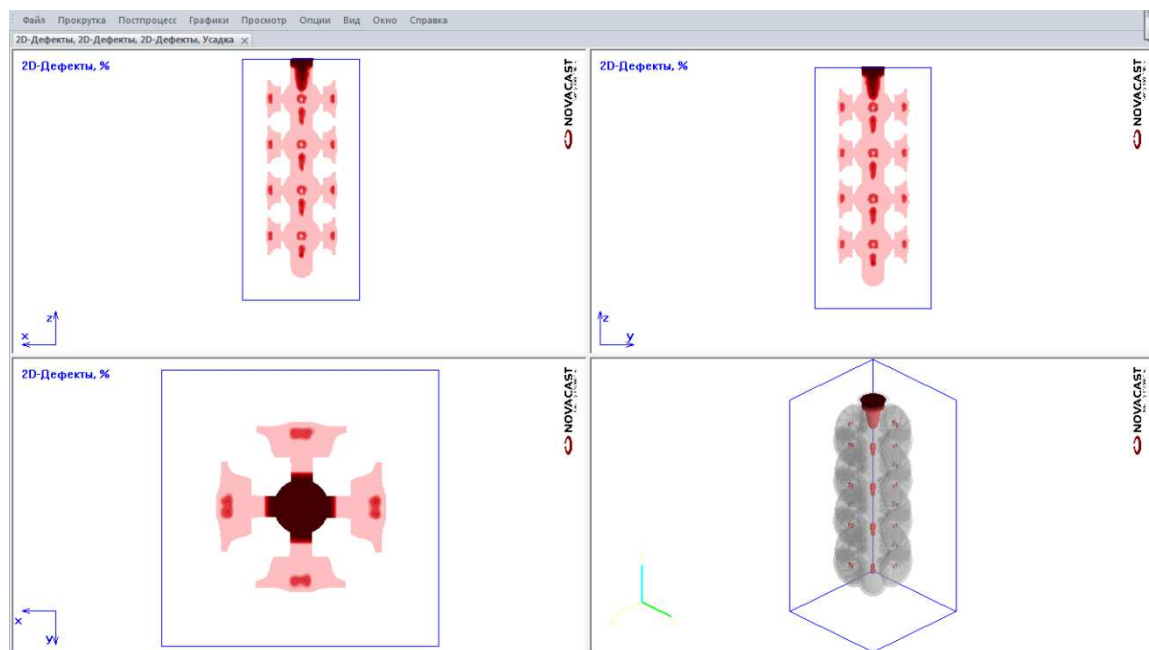


Рисунок 36 – результаты моделирования в программе LVMflow

Результаты моделирования показывают, в каких местах возможно образование дефектов усадочного характера. Размеры литниково-питающей системы:  $D_{ст.} - 30\text{мм.}$ ,  $L - 300\text{мм.}$

Из полученных результатов, при моделировании отливки следует вывод: данная литниковая система, не обеспечивает бездефектную заливку. В связи с этим, было принято решение: изменить диаметр стояка с 30 до 40 мм.

Для точного поиска решения проблемы следует многократно изменять конфигурацию элементов ЛПС с последующей заливкой. Такой метод «естественного отбора» позволит найти нужное решение для улучшения качества отливки.

В результате естественного отбора, изменится выход годного.

На рисунке 37 изображены результаты моделирования с измененной конфигурацией литниково-питающей системы

### Исследование №2

Размеры литниково-питающей системы:  $D_{ст.} - 40\text{мм.}$ ,  $L - 300\text{мм.}$

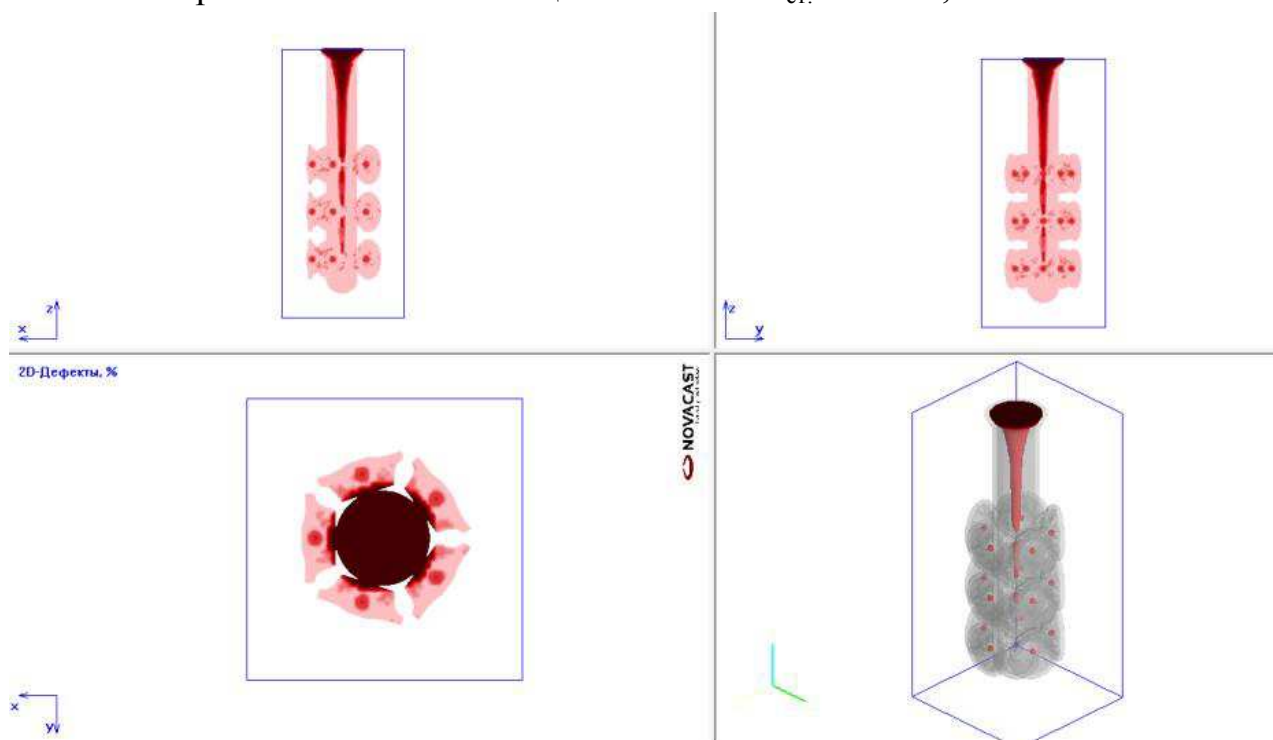


Рисунок 37 – Результаты моделирования в программе LVMflow, с дефектами после изменения ЛПС

На рисунке 38 изображены результаты моделирования с измененной конфигурацией литниково-питающей системы

*Исследование №3*

Размеры литниково-питающей системы:  $D_{ст.} - 45\text{мм.}$ ,  $L - 320\text{мм.}$

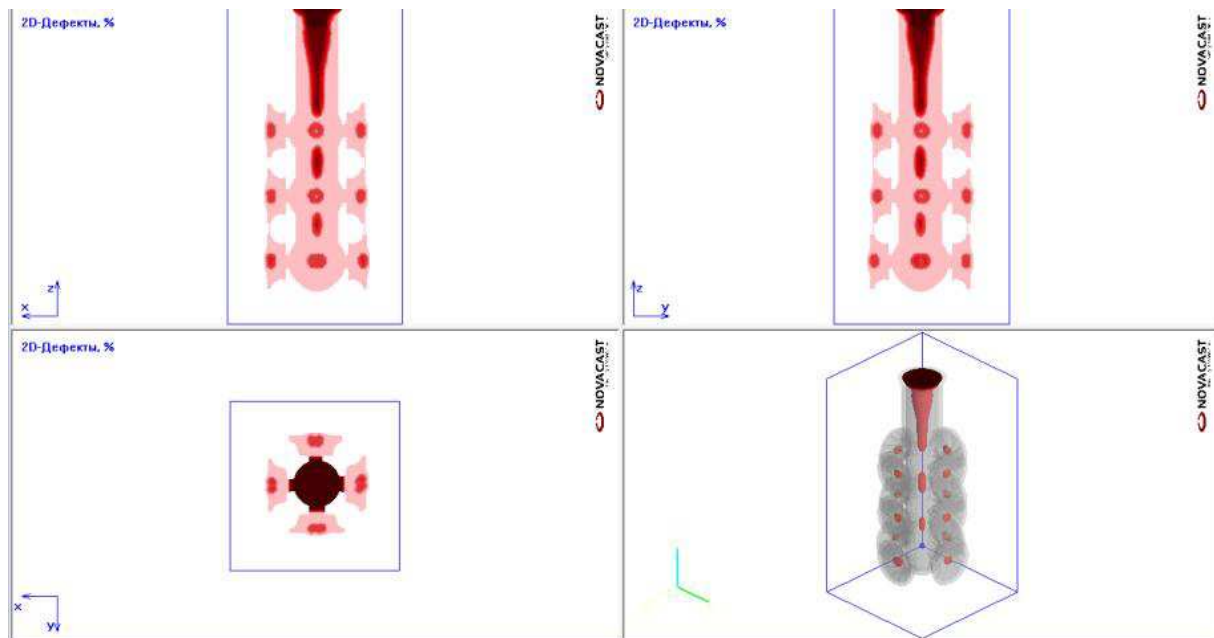


Рисунок 38 – Результаты моделирования в программе LVMflow, с дефектами после изменения ЛПС

После множества неудачных заливок было принято решение изменить конструкцию литниково-питающей системы, так как ранее выбранная, не обеспечивала необходимое качество отливки.

На рисунке 39 показана схема модельного блока с измененной конструкцией литниково-питающей системы.

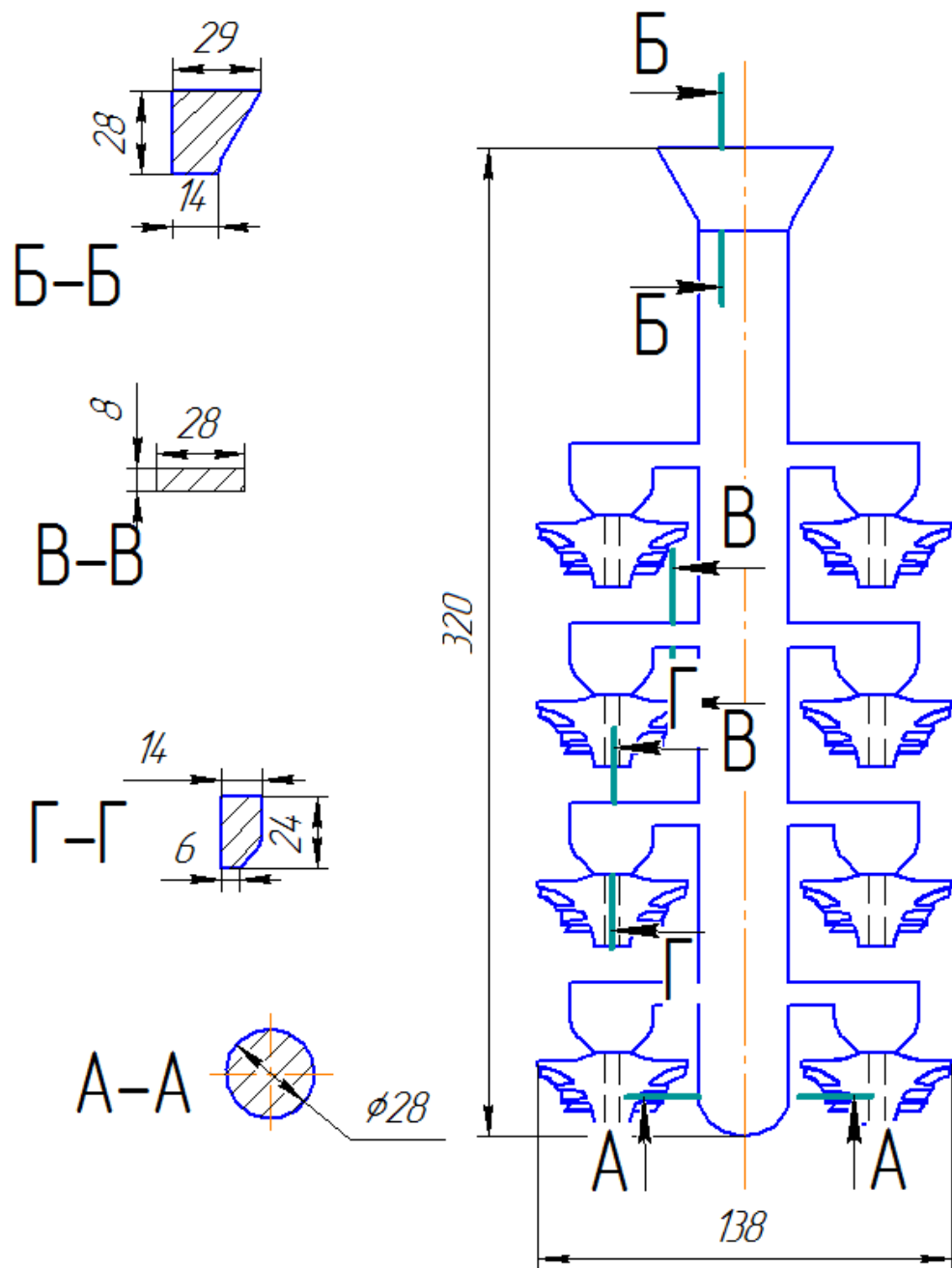


Рисунок 39 – Схема модельного блока с элементами литниково-питающей системы

По заданной схеме модельного блока с элементами литниково-питающей системы, изображенной на рисунке 39, в системе автоматического проектирования SolidWorks построена 3D модель блока с измененной конструкцией литниково-питающей системы, представленная на рисунке 40.

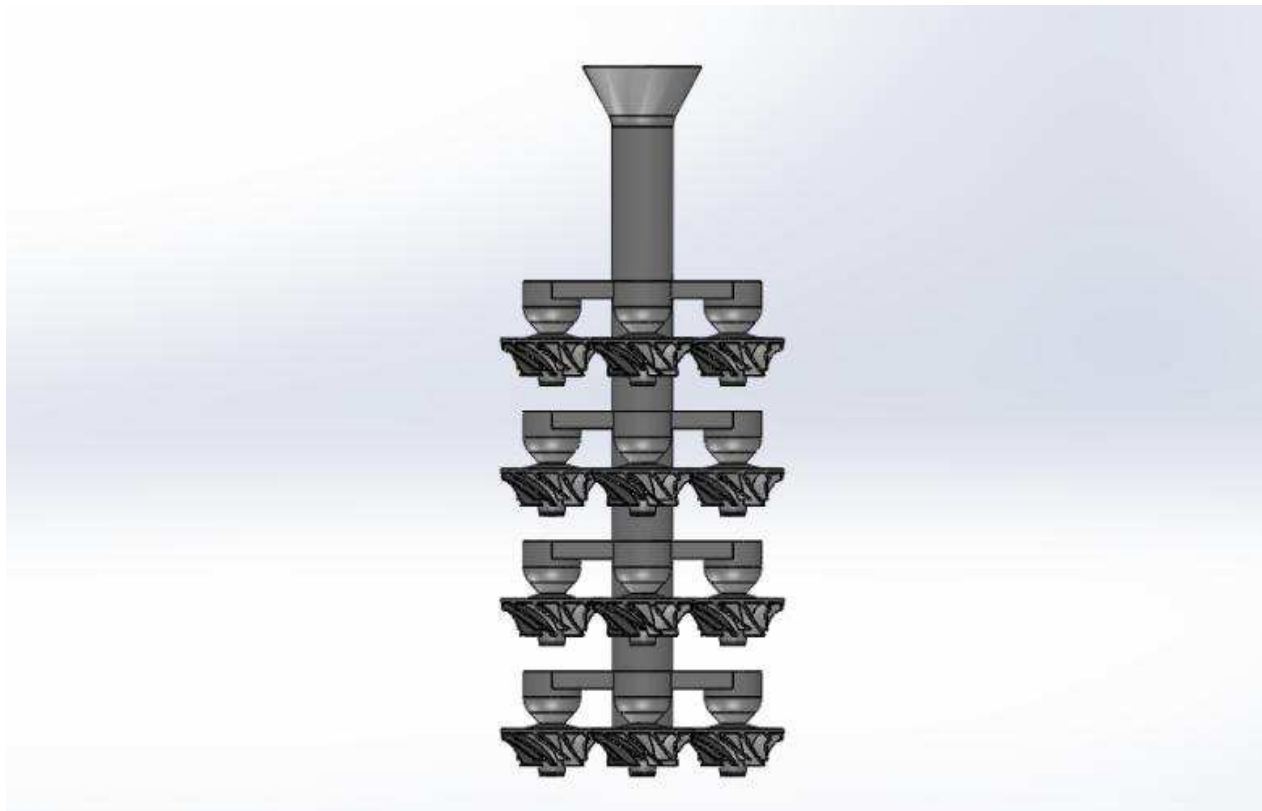


Рисунок 40 – 3D модель отливки с элементами литниково-питающей системы

С применением данной конструкции литниково-питающей системы качество отливки улучшилось. Судя по полученному результату, изображенном на рисунке 41, вся усадка ушла в стояк и прибыль. Данный результат можно улучшить, изменяя размеры литниково-питающей системы.

#### Исследование №4

Размеры литниково-питающей системы:  $D_{ст.} - 35\text{мм.}$ ,  $L - 320\text{мм.}$

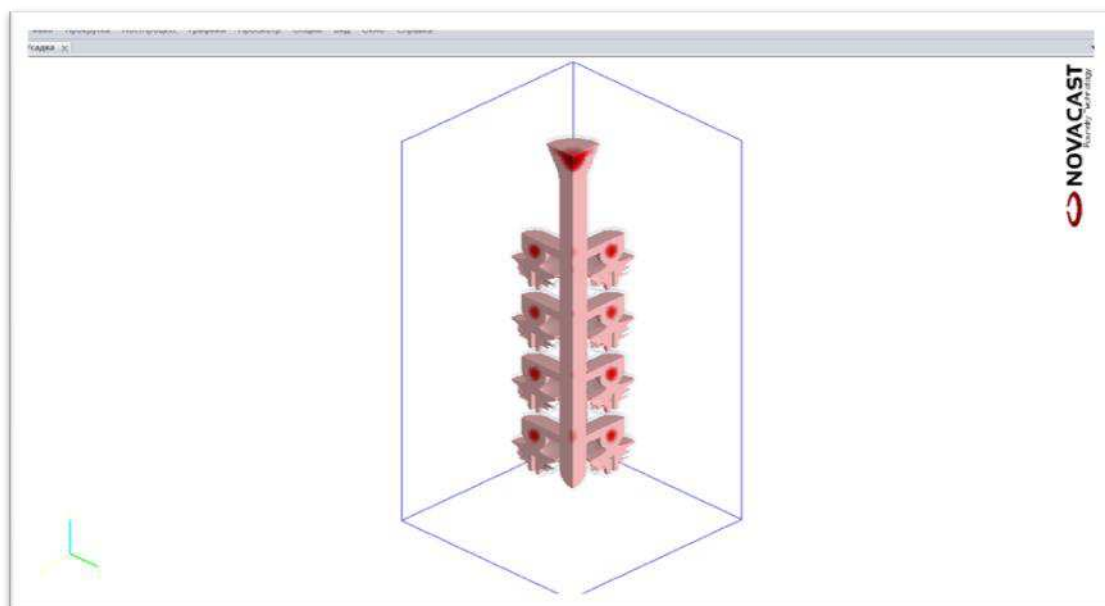


Рисунок 41 – Результаты моделирования в программе LVMflow, качественная отливка после изменения ЛПС

Результаты моделирования с наиболее оптимальной конфигурацией литниково-питающей системы представлены на рисунке 42.

#### Исследование №5

Размеры литниково-питающей системы:  $D_{ст.} - 30\text{мм.}$ ,  $L - 320\text{мм.}$

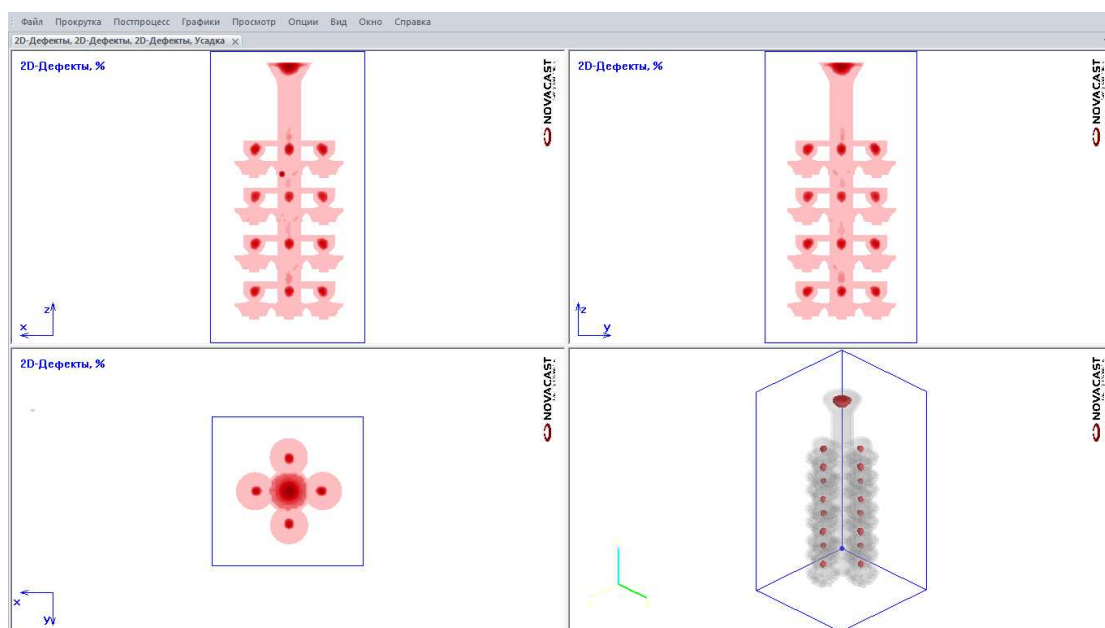


Рисунок 42 – Результаты моделирования в программе LVMflow, качественная отливка с наиболее оптимальным размером стояка



Экспериментируя с размерами стояка, удалось подобрать наиболее оптимальный и выгодный вариант литниково-питающей системы, не влияющей на качество отливки:  $D_{ст} = 30\text{мм.}$ ,  $L_{ст} = 320\text{мм.}$

Изменяя размеры ЛПС, производится полный пересчет данных с получением нового выхода годного [18].

Технологический выход годного при такой конфигурации ЛПС равен:

$$\eta = 1344/4369 * 100 = 30.76\%$$

В практике производства отливок по выплавляемым моделям обычно  $ТВГ = 0,1 - 0,6$ , наше значение  $ТВГ - 30.76\%$ , что входит в этот интервал.

## 9 Моделирование литейных процессов в программе ProCAST

Разработчики избрали нестандартный путь построения системы: составляющие ее модули-решатели соответствуют не конкретным литейным технологиям, а физическим процессам, которые в различных сочетаниях реализуются этими технологиями.

Пользователь формирует расчетную модель, а необходимые решатели подключаются в процессе решения (какие именно — зависит от набора параметров).

Доступ к модулям, с которыми непосредственно работает пользователь, осуществляется из вкладки *File Manager*. Рассмотрим ее подробнее:

- *MeshCAST* — полностью автоматический генератор 2D и 3D (тетраэдральной) конечно-элементной сетки для системы ProCAST;
- *PreCAST* — препроцессор для ProCAST, позволяющий считывать конечно-элементную модель, назначать свойства материалов для различных компонентов модели, задавать контактные, граничные и начальные условия;
- *DataCAST* — компилирует настройки и создает файлы, необходимые для расчета;
- *ProCAST* — осуществляет анализ;
- *ViewCAST* — представляет собой постпроцессор, позволяющий визуализировать результаты расчета в виде отчета ProCAST;
- *Status* — помогает отслеживать выполнение расчета.

Вычислительные ресурсы ProCAST определяются решателями, реализующими самые передовые расчетные модели и подходы:

- *ProCAST Thermal Solver* — расчетный модуль моделирования теплового процесса, учитывающий процессы затвердевания и формирования усадочных дефектов;
- *Radiation Module* — модуль расчета теплоизлучения в процессе кристаллизации отливки;
- *ProCAST Flow Solver* — модуль, рассчитывающий течение потока расплава и анализирующий заполнение формы;
- *Lost Foam option* — опция к Flow Solver, предназначенная для расчета процесса литья по выжигаемым моделям;
- *Tixocasting option* — опция к Flow Solver для расчета литья тиксоматериалов;
- *Centrifugal option* — опция для расчета центробежного литья;
- *Core Blowing option* — опция, обеспечивающая расчет изготовления песчаных стержней;
- *ProCAST Stress Solver* — модуль расчета напряжений и деформаций (термические напряжения) по упруго-пластичным и упруго-вязкопластичным моделям;
- *Grain Structure Module (CAFE)* — модуль стохастического прогнозирования качества процесса кристаллизации отливки, а также моделирования эволюции зерен и их роста в структуре расплава при затвердевании;
- *Microstructure Module* — расчет фазовых состояний микроструктуры для сплавов;
- *Inverse Module* — модуль обратного моделирования для уточнения граничных условий процесса по полученным экспериментальным замерам;
- *Porosity Module* — расчет макро - и микропористости в получаемой отливке [22].

Все модули моделируют реальную физику соответствующих процессов (теплопроводность, потоки, напряжения и т.д.) и, следовательно, применимы к любому типу технологических процессов литья, где должны учитываться эти физические явления. Модульного деления по виду применяемых материалов нет. Благодаря этому, например, один и тот же модуль течения *Fluids Module* может успешно применяться для чугуна, стали, алюминия и т.д., причем система по умолчанию учитывает специфику расчета выбранного материала.

ProCAST представляет собой законченное решение, охватывающее широкий спектр литья металлов и сплавов. Большая часть сталей, чугунов,

сплавов Al, Co, Cu, Mg, Ni, Ti и Zn представлена в соответствующих базах данных системы, открытых для пополнения и обновления. Интерфейс позволяет автоматически рассчитать свойства сплава, просто задавая его состав [23].

### *Исследование №6*

В данном исследовании за основу была взята модель с наиболее оптимальным размером стояка отливки:  $D_{ст} = 30\text{мм.}$ ,  $L_{ст} = 320\text{мм.}$ , представленная на рисунке 42. которой удалось добиться с применением предыдущей программы LVM FLOW.

Результаты моделирования в программном обеспечении ProCAST приведенные на рисунках 43, 44 позволяют более детально изучить возможность появления усадочной пористости в процентном соотношении по шкале от 0 до 100. Что позволяет более точно спрогнозировать образование дефектов и более точно оптимизировать литниково-питающую систему без натуральных экспериментов.



Рисунок 43 – результаты моделирования в программе ProCAST (разрез по оси: YZ)

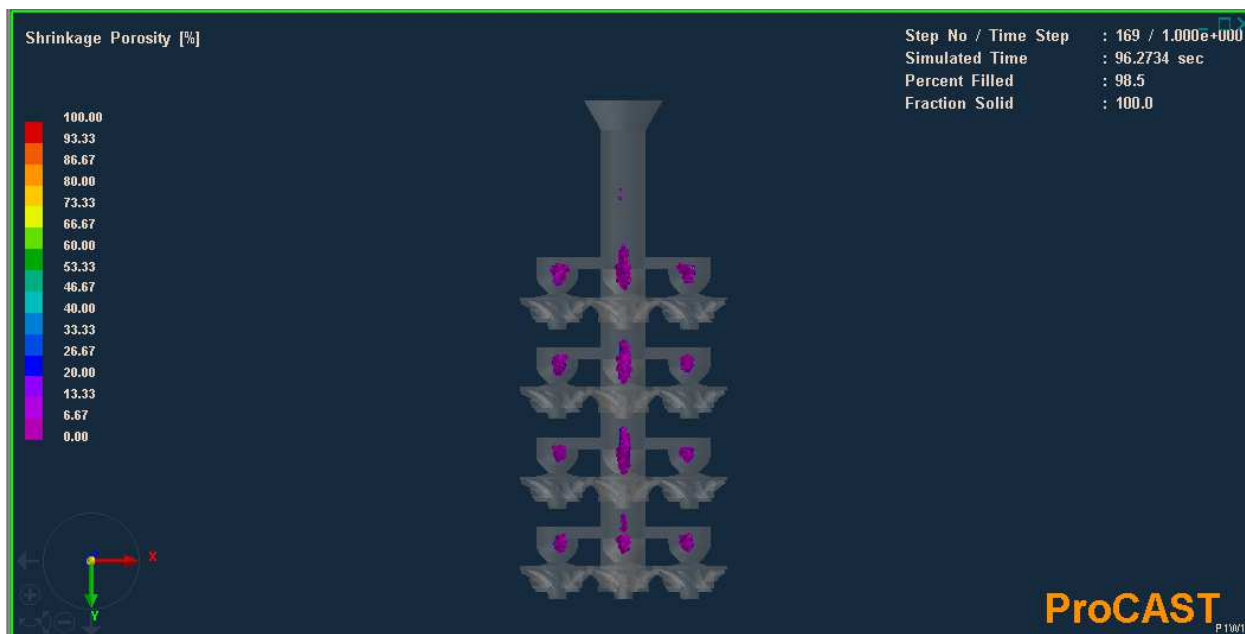


Рисунок 44 – результаты моделирования в программе ProCAST (усадочная пористость)

В результате проведенного компьютерного моделирования в системе ProCAST были автоматически устранены дефекты чертежей, которые были в изначальной модели. Была построена и оптимизирована 2D и 3D сетки, которые обеспечили возможность создания более качественной оболочковой формы литья. Результаты моделирования после оптимизации модели изображены на рисунках 45, 46.



Рисунок 45 – результаты моделирования в программе ProCAST после оптимизации (разрез по оси: YZ)

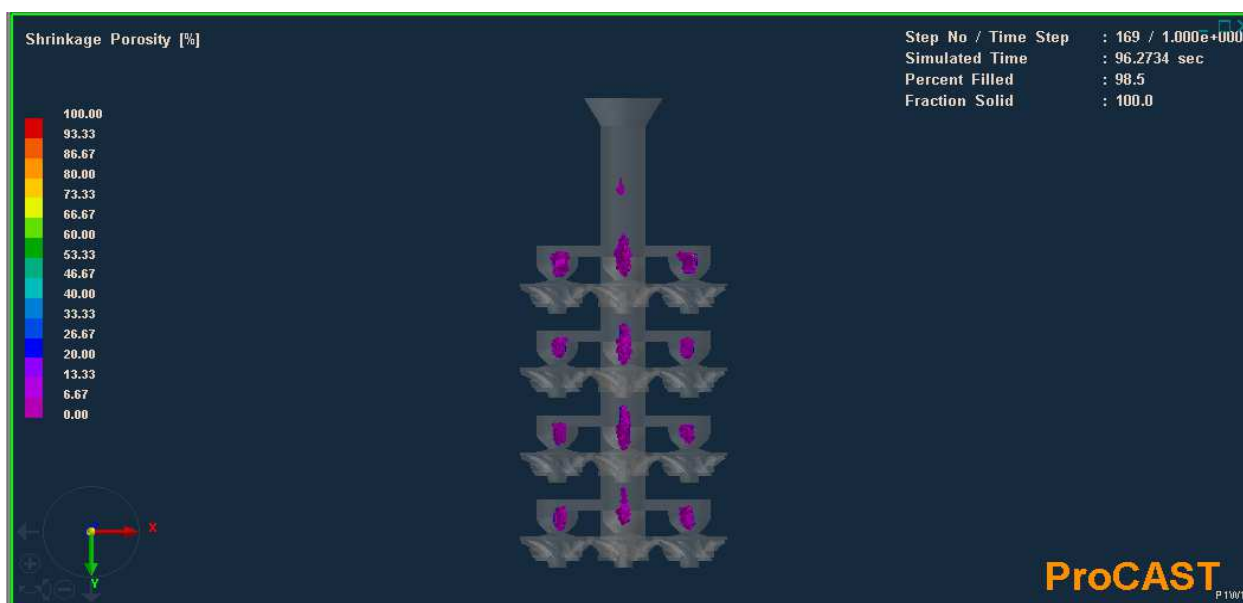


Рисунок 46 – результаты моделирования в программе ProCAST после оптимизации (усадочная пористость)

После автоматической оптимизации 2D и 3D сетки модели, удалось добиться наиболее оптимального и выгодного результата.

Уменьшение размера литниково-питающей системы отливки с  $D_{ст} = 30\text{мм.}$ ,  $L_{ст} = 320\text{мм.}$  до  $D_{ст} = 27\text{мм.}$ ,  $L_{ст} = 310\text{мм.}$  позволило повысить технологический выход годного с 30.76% до 31.92%.

Выход годного при такой конфигурации ЛПС равен:

$$\eta = 1344/4210 * 100 = 31.92\%$$

Полученные результаты, которые изображены на рисунках 45, 46 - можно использовать для изготовления оснастки и подбора технологического оборудования.

#### **10. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок**

Мною разработана схема технологического процесса для изготовления отливок «Колесо компрессора», рисунок 47.

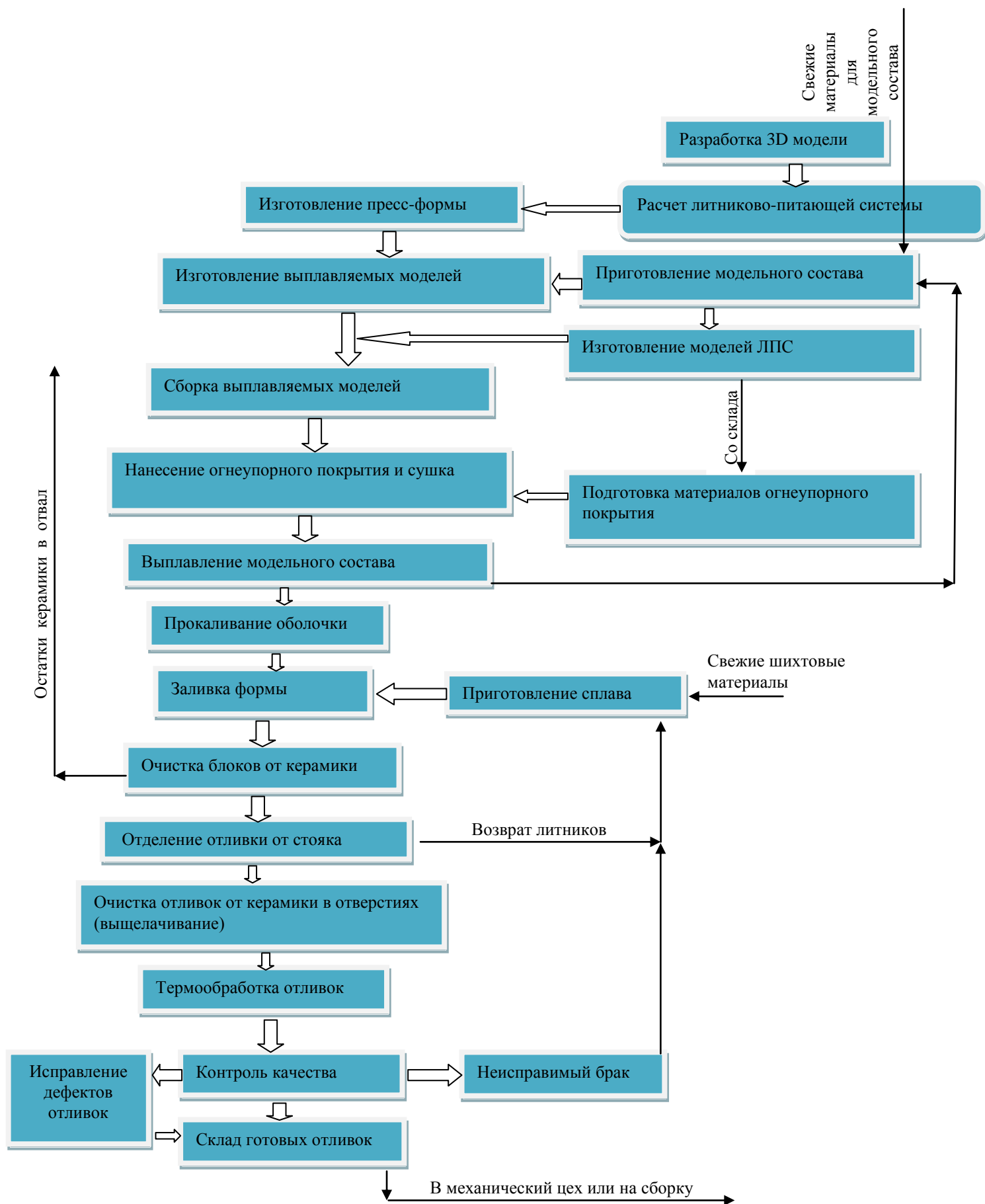


Рисунок 47 – Схема технологического процесса изготовления отливок «Колесо компрессора»



Исходя из полученной металлоемкости и характеристик плавильных печей, выбираем индукционно-тигельную печь компании «inductotherm group». Печь обеспечивает точное управление разливкой, которое необходимо, если для операции требуется точная разливка в стационарное отверстие. Разработанный механизм наклона обеспечивает минимальное перемещение потока расплавленного металла после начала разливки, обеспечивая при этом максимальную «досыгаемость». Гидравлическая наклонная печь Dura-Line™ обеспечивает плавную и контролируемую разливку, что делает ее идеальной, когда необходимо поддерживать точное положение разлива. Это действие также позволяет быстрее контролировать заливку. Печь компании «inductotherm group» мощностью 200 кВт, объемом 250 кг, представлена на рисунке 48 [16].



Рисунок 48 – Индукционно-тигельная печь фирмы «Inductotherm Group» объемом 250 кг

Далее: *Автомат для приготовления модельной пасты модели 61701* изображенный на рисунке 49, предназначен для приготовления модельной пасты с температурой плавления не выше 90°C, применяемой для изготовления моделей при серийном и массовом производстве отливок по выплавляемым моделям. Он выполняет следующие операции:

- расплавление твердого модельного состава;
- фильтрация и перемешивание расплавленного модельного состава;
- термостатирование модельного состава;
- приготовление модельной пасты с замешиванием в нее воздуха;
- перемешивание модельной пасты;
- подача модельной пасты, по обогреваемым пастопроводам, к шприцам машин для изготовления моделей.



Рисунок 49 – Автомат для приготовления модельной пасты

Автомат, изображенный на рисунке 50, предназначен для изготовления модельных звеньев из легкоплавких модельных составов при серийном и массовом производстве стального и цветного литья по выплавляемым моделям. Автомат работает в автоматическом и наладочном режимах. Автомат работает только с пресс-формами, основные размеры которых соответствуют ГОСТ 19947, снабженными механизмами выталкивания модельных звеньев.

На автомате выполняются следующие технологические операции:

- смыкание и размыкание пресс-форм;
- запрессовка модельного состава;
- периодический поворот стола с пресс-формами;
- охлаждение модельных звеньев; - выталкивание готовых модельных звеньев;
- смазка пресс-форм;
- двойная прочистка литникового отверстия пресс-форм;
- удаление модельных звеньев из зоны раскрытия пресс-форм.



Рисунок 50 – Автомат для изготовления модельных звеньев модели модификация: 61201А

Агрегат приготовления огнеупорного покрытия, изображенный на рисунке 51, предназначен для непрерывного приготовления огнеупорного покрытия на основе этилсиликата для изготовления форм при литье по выплавляемым моделям. Агрегат может использоваться в непрерывном или циклическом (для приготовления отдельных порций огнеупорного покрытия) режимах работы. Конструкция агрегата предусматривает возможность его эксплуатации во взрывоопасных помещениях не выше класса В-1а.



Рисунок 51 – Агрегат приготовления огнеупорного покрытия модели, модификация: 662А

Бак с мешалкой для обмазки блоков изображен на рисунке 52. Установка предназначена для нанесения вручную огнеупорного покрытия на модельные блоки, а также для поддержания стабильности консистенции и температуры огнеупорного покрытия и применяется при мелкосерийном и серийном производстве литья по выплавляемым моделям [19].



Рисунок 52 – Бак с мешалкой для обмазки блоков модификация: 9190

Бойлерклав для выплавки модельного состава, представлен на рисунке 53. Бойлерклав предназначен для расплавления и удаления модельного состава из керамических форм при производстве отливок методом литья по выплавляемым моделям. Бойлерклав позволяет производить выплавку модельного состава из керамических форм сложной конфигурации (турбинные лопатки, рабочие колеса, направляющие аппараты и др.). Также имеется возможность выплавки модельного состава из крупногабаритных блоков диаметром 750 мм и длиной 550 мм. Позволяет производить выплавку различных типов модельных масс: восковых, солевосковых, солевых.



Рисунок 53 – Бойлерклав модификация: 64501

Установка для отделения керамики изображена на рисунке 54. Установка предназначена для предварительной очистки способом ударной вибрации блоков отливок (преимущественно из углеродистых сталей) от керамики при серийном и мелкосерийном производстве точного литья по выплавляемым моделям, а также может быть использована для отделения отливок от стояка блока. Установка представляет собой звуко- и виброизолирующий корпус с размещенным в нем виброударным устройством и механизмом зажима блоков. Обрабатываемый блок устанавливается между опорным кулаком и ударником виброударного устройства и зажимается. После закрытия двери автоматически включается виброударное устройство. За счет ударной вибрации происходит разрушение и отделение керамической оболочки с поверхности металлического блока. Образующаяся при этом керамическая крошка сыпается в ящик или через отверстие в основании корпуса на цеховой транспортер. Пылевидные частицы керамики удаляются через специальное окно в цеховую вытяжную вентиляционную систему. За процессом отделения керамики оператор наблюдает через смотровое окно в загрузочной двери. При длительной обработке стальных блоков и наличии подреза в питателе, связывающем отливку со стояком, можно осуществлять отделение отливок от стояка.





Рисунок 54 – Установка для отделения керамики модификация: 6А92

Пресс гидравлический, изображенный на рисунке 55. Предназначается для отделения отливок от стояка в цехах литья по выплавляемым моделям в крупносерийном, массовом и мелкосерийном производстве при сборке блоков на стояках круглого сечения. Состоит из С-образной сварной станины, на которой размещены цилиндры, приспособления для отделения деталей и центровки блока, гидрооборудование и механизмы управления.



Рисунок 55 – Пресс гидравлический для отделения отливок от стояка модификация: 6А93

Установка для очистки отливок от керамики, изображена на рисунке 56. Установка предназначена для выщелачивания в кипящем щелочном растворе остатков керамики с поверхности отливок, полученных методом литья по выплавляемым моделям, после отделения керамической формы [20].



Рисунок 56 – Установка для очистки отливок от керамики модификация: АВА 1970Л



## 11 Расчёт шихтовых материалов, нормы расхода основных материалов и расчет стоимости

Расчёт ведём из условия, что плавка будет проводиться используя свежие материалы, лом и возврат собственного производства.

Используя две различные программы моделирования литейных процессов (LVMflow и ProCAST) мы получили разные результаты технологического выхода годного, а именно с помощью программного обеспечения ProCAST удалось добиться повышения ТВГ с 30.86% до 31.92%, исходя из полученных результатов, будет произведено два расчета.

Для того чтобы произвести расчеты, необходимо установить исходные данные. Исходные данные для ТВГ 30.86% представлены в таблице 15. Исходные данные для ТВГ 31.92% представлены в таблице 16. Все расчеты производились в программе Microsoft Excel 2007 [24].

Таблица 15 – Исходные данные для расчета металлозавалки (ТВГ – 30.86%)

20X5МЛ					
Si	Mn		Cr	Mo	C
0,35-0,7	0,4-0,6		4-6,5	0,4-0,65	0,15-0,25
Данные		%	кг		
Выход годного		30.86	1000		
Брак		4	129.618		
Угар		2	64.8088		
Литники и прибыли		58.64	1900.19		
Безвозвратные потери		2	64.8088		
Скrap		2.5	81.011		
итог:		100	3240.4407		

Таблица 16 – Исходные данные для расчета металлозавалки (ТВГ – 31.92%)

20X5МЛ					
Si	Mn		Cr	Mo	C
0,35-0,7	0,4-0,6		4-6,5	0,4-0,65	0,15-0,25
Данные		%	кг		
Выход годного		31.92	0		
Брак		4	125.313		
Угар		2	62.6566		
Литники и прибыли		57.58	1803.88		
Безвозвратные потери		2	62.6566		
Скrap		2.5	78.3208		
итог:		100	3132.83208		

Далее представлен расчет шихты при использовании свежих материалов ломе и возврат собственного производства, в таблице 17 представлен расчет для ТВГ 30.86%, в таблице 18 представлен расчет для ТВГ 31.92%

Таблица 17 – Расчет шихты на свежих материалах, ломе и возврате собственного производства

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %											Усвоение %
		Mn		Si		Cr		Mo		C		
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	
Возврат 20X5МЛ	65.14	0.5	0.322443	0.52	0.335341	4.7	3.0309642	0.6	0.386932	0.17	0.10963	99
Лом 15X5	32.5	0.5	0.160875	0.5	0.160875	4.5	1.447875			0.15	0.04826	99
Угар		15	0.0999183		0	5	0.235	3	0.018	10	0.017	
С учетом угара			0.4053287		0.680875		5.912875		0.582		0.20126	
Мн 998 (марганец)	0.186515662	99	0.182804	0	0							99
Х99(Хром)	1.702923987	0	0	0	0	99	1.6690358	0	0	0	0	99
С (углерод)	0.061595123	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0.06037	99
Кр0 (кремний)	0.188408611	0	0	99	0.184659			0	0	0	0	99
МЧ(молибден)	0.217394552	0	0	0	0	0	0	99	0.213068	0	0	99
<b>Итого:</b>	<b>99.99683793</b>	<b>0,4-0,6</b>	<b>0.4053287</b>	<b>0,35-0,7</b>	<b>0.52</b>	<b>4-6,5</b>	<b>5.912875</b>	<b>0,4-0,65</b>	<b>0.582</b>	<b>0,15-0,25</b>	<b>0.20126</b>	

Таблица 18 – Расчет шихты на свежих материалах, ломе и возврате собственного производства

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %											Усвоение %
		Mn		Si		Cr		Mo		C		
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	
Возврат 20X5МЛ	64.08	0.5	0.317196	0.52	0.329884	4.8	3.0450816	0.5	0.317196	0.17	0.10785	99
Лом 15X5	33.5	0.5	0.165825	0.5	0.165825	4.5	1.492425			0.15	0.04975	99
Угар		15	0.09987375		0	5	0.24	3	0.015	10	0.017	
С учетом угара			0.40012625		0.685825		6.052425		0.485		0.20275	
Мн 998 (марганец)	0.186515662	99	0.182804	0	0							99
Х99(Хром)	1.790550352	0	0	0	0	99	1.7549184	0	0	0	0	99
С (углерод)	0.063415325	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0.06215	99
Кр0 (кремний)	0.193976288	0	0	99	0.190116			0	0	0	0	99
МЧ(молибден)	0.186515662	0	0	0	0	0	0	99	0.182804	0	0	99
<b>Итого:</b>	<b>100.0009733</b>	<b>0,4-0,6</b>	<b>0.40012625</b>	<b>0,35-0,7</b>	<b>0.52</b>	<b>4-6,5</b>	<b>6.052425</b>	<b>0,4-0,65</b>	<b>0.485</b>	<b>0,15-0,25</b>	<b>0.20275</b>	

Далее производится расчет нормы расхода материалов, расчет стоимости свежих материалах.

Полученные результаты процентного содержание в шихте всех компонентов переносятся в таблицы 19, 20 норм расходов. Напротив, каждого элемента указывается номер госта. Рассчитывается масса каждого элемента с учетом металлозавалки и выхода годного, полученные результаты вносятся таблицы.

Найденные в интернете данные о стоимости каждого элемента также вносятся таблицы 19, 20. Для того что бы узнать общую стоимость всех шихтовых материалов необходимо, умножить стоимость каждого материала на его массу. Суммируем все цены и получаем общую стоимость шихтовых

материалов, на плавку массой равной 3240,4407 кг. для таблицы 19 и 3132.83208 кг. для таблицы 20.

Таблица 19 – Норма расхода материалов и расчет свежих материалов для ТВГ 30.86%

Норма РАСХОДА				Загрз. масса	Цена за кг.(рубли)	Общая сумма
	Гост, ТУ	норма расхода				
		%	кг/т			
Лом 15X5	ГОСТ 20072 - 74	32.5	325	1053.1432	20	21062.86455
Возврат 20x5мл	ГОСТ 5632 - 72	65.14	651.4	2110.8231		
Х99(Хром)	<a href="#">ГОСТ 5905 - 2004</a>	1.702924	17.02924	55.182242	730	40283.03664
С (улерод)	<a href="#">ГОСТ 16099 - 80</a>	0.061595	0.615951	1.9959534	150	299.393015
Мп 998 (марган)	<a href="#">ГОСТ 6008 - 90</a>	0.186516	1.865157	6.0439294	140	846.1501177
Кр0(Кремний)	<a href="#">ГОСТ 2169-69</a>	0.188409	1.884086	6.1052693	140	854.7377055
МЧ(молибден)	<a href="#">ГОСТ 25442 - 82</a>	0.217395	2.173946	7.0445415	5500	38744.97841
	итог:		999.9684	3240.3382	<b>102091.1604</b>	

Таблица 20 – Норма расхода материалов и расчет стоимости свежих материалов для ТВГ 31.92%

Норма РАСХОДА				Загрз. масса	Цена за кг.(рубли)	Общая сумма
	Гост, ТУ	норма расхода				
		%	кг/т			
Лом 15X5	ГОСТ 20072 - 74	33.5	335	1049.4987	20	20989.97494
Возврат 20x5мл	ГОСТ 5632 - 72	64.08	640.8	2007.5188		
Х99(Хром)	<a href="#">ГОСТ 5905 - 2004</a>	1.79055	17.9055	56.094936	730	40949.30316
С (улерод)	<a href="#">ГОСТ 16099 - 80</a>	0.063415	0.634153	1.9866956	150	298.0043466
Мп 998 (марган)	<a href="#">ГОСТ 6008 - 90</a>	0.186516	1.865157	5.8432225	140	818.0511477
Кр0(Кремний)	<a href="#">ГОСТ 2169-69</a>	0.193976	1.939763	6.0769514	140	850.7731936
МЧ(молибден)	<a href="#">ГОСТ 25442 - 82</a>	0.186516	1.865157	5.8432225	5500	32137.72366
	итог:		1000.01	3132.8626	<b>96043.83045</b>	

Полученные результаты сведем в общую диаграмму, изображенную на рисунке 57.

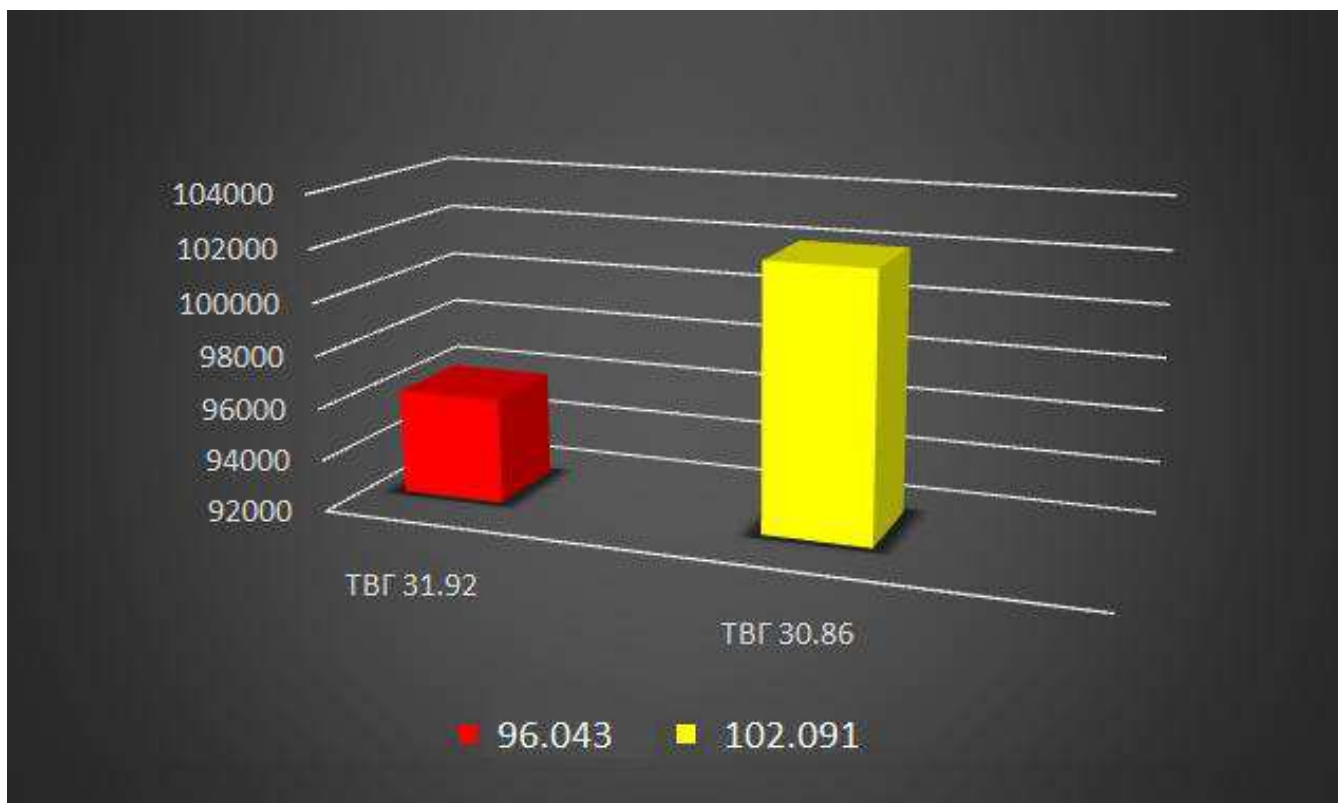


Рисунок 57 – стоимость свежих материалов кг/т. годного

Таким образом с помощью программного обеспечения ProCAST нам удалось добиться снижения затрат на свежие материалы. Из расчета на 1000 кг выгода составляет: 6.048 рублей.

Так по примеру завода «КалугаТрансМаш» мощностью 200т в год при использованной мною технологии условный экономический эффект составит: 1.209.600 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были рассмотрены характеристики жаропрочных сплавов, их классификация и применение в производстве, литейные свойства жаропрочных сплавов, и современное плавильное оборудование. А так же способы получения отливок из жаропрочных сплавов при литье по выплавляемым моделям.

Была разработана технология изготовления отливок способом литья по выплавляемым моделям из сплава 20Х5МЛ. А именно: произведен расчет литниково-питающей системы, построена 3D модель в САПР SolidWorks, произведено моделирование литейных процессов в программах LVMflow и программе ProCAST, проведены изменения, устраняющие дефекты в отливке, определен выход годного, и исходя из этого, произведен выбор необходимого технологического оборудования.

Прежде чем получить удовлетворительный результат, было проведено 7 исследований, с различной конфигурацией литниково-питающей системы. Наблюдение за развитием процессов и четкое хронометрирование образования дефектов в программах LVMFlow и ProCAST дает возможность понять, когда и в какой области дефекты могут возникнуть, что в свою очередь, дает возможность для быстрого реагирования и внесения изменений в конструкцию.

Завершающим этапом данной работы является расчет норм расхода на свежие шихтовые материалы. Он показал преимущество использования программы ProCAST при разработке технологии изготовления отливок.

Необходимо отметить, что использование этих программ, а особенно ProCAST недостаточно широко применяются на производстве из-за сложности внедрения. А именно: из-за цены программного обеспечения и отсутствия специалистов умеющих работать в данном ПО.

Выполненная работа соответствует требованиям технического задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О.Е. Осинцев. Металловедение тугоплавких металлов и сплавов на их основе. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2013. – 156 с.
2. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2015. – 1216 с.
3. А.А.Попов. Материаловедение. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы. Учебное пособие. – М.: Юрайт, 2017. – 162 с.
4. Структура и механические свойства при комнатных и высоких температурах (Н.С. Самойлов)/[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.naukaspb.ru/>
5. В.В. Сидоров, Д.Е. Каблов, В.Е. Ригин. Металлургия литейных жаропрочных сплавов. Технология и оборудование. – М.: ВИАМ, 2016. – 368 с.
6. Корпорация ВСМПО АВИСМА/Строительство [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vsm-po.ru>.
7. Титов. А.В. Производство отливок из титановых сплавов: учебное пособие / Титов. А.В - Нижний Новгород, 2015
8. Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>.
9. Комарь С.А. Разработка технологии изготовления литейной формы с помощью специализированных САПР: дис. Шамина О.Б. доцент, ктн 15.04.01 / Комарь Сергей Андреевич. – Томск, 2016.
10. Савельев Ю. CAD Master Машиностроение Литье по выплавляемым моделям: взгляд изнутри / Савельев Ю. – 4 изд., 2004 – с. 1-6
11. Сплавы на железоникелевой основе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.su/>
12. Жаропрочные деформируемые сплавы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://viam.ru/>
13. О.С.Нургаянова, А.А.Ганеев, Синтез литейных никелевых жаропрочных сплавов для отливок с направленной и монокристаллической структурой /Вестник УГАТУ Машиностроение, Уфа : УГАТУ, 2007/УДК 517.531.72/ 10 с.
14. Е.Н. Каблов, Физико-химические и технологические особенности соединения жаропрочных сплавов, содержащих рений. ВИАМ / 2005-204296, 27 с.

15. Надежда Протасова, Татьяна Захарова und Светлана Теплова. Повреждаемость и регенерация структурного состояния турбинных лопаток. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 92 с.
16. ООО «Индуктотерм» - дочерняя компания InductothermCorp [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.ruscastings.ru>
17. Индукционные печи и миксеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.ruscastings.ru>
18. А.Ю. Коптева «Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана» Сибирский Федеральный Университет / Красноярск 2018, 76 с.
19. Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. Технология литейного производства. Специальные виды литья. – М.: Академия, 2008. – 352 с
20. Жанат Буканов, Лев Семёнович und Серик Кузембаев. Оборудование литейных цехов. – М.: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 84 с.
21. Андрей Соловьёв und Павел Воробкалов. Моделирование условий образования газовых раковин. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 80 с.  
Татьяна Сушко und Татьяна Пашнева. Моделирование технологии отливки посредством СКМ LVM Flow. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 136 с.
22. Дмитрий Пустовалов. Разработка литейных моделей с прибылями. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 84 с.
23. Мария Пономарева und Владимир Якутенюк. Метод граничных элементов для решения уравнений Стокса. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 160 с.
24. Расчет шихты для выплавки легированной стали: Методические указания к практической работе для студентов специальностей 110400 и 121200 “Литейное производство черных и цветных металлов” и “Технология художественной обработки материалов” / Сост. А.Ф. Мащенко, А.В. Щекин – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос.техн.ун-та, 2003. – 32 с.



