

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  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Особенности синтеза жаропрочных сплавов и разработка технологии  
проектирования литых заготовок

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

22.04.01.04 «Синтез и литье новых металлических материалов»

Научный руководитель	_____	_____	<u>В.А. Кукарцев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____	_____	<u>М.О. Дутов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	_____
	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  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г.

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

Студент Дутов Максим Олегович

Группа МТ17-01М Направление (специальность) 22.04.01.04

«Синтез и литье новых металлических материалов»

Тема выпускной квалификационной работы:

«Особенности синтеза жаропрочных сплавов и разработка технологии проектирования литых заготовок»

Утверждена приказом по университету №от

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

Исходные данные для ВКР:

- изучить особенности синтеза и свойства жаропрочных сплавов, обладающих высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред;
- разработать технологию производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью из жаропрочных сплавов с использованием программы моделирования LWMFlowCV;
- произвести выбор основного 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. Плавка металла и заливка форм
6. Способы изготовления форм, Формовочные смеси и связующие материалы
7. Разработка технологии производства отливок из сплава 40X24H12СЛ
8. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок
9. Расчёт норм расхода основных материалов

Перечень графического материала:

- чертежи деталей;
- чертёж отливки;

Руководитель ВКР

В.А. Кукарцев

инициалы и фамилия

подпись

Задание принял к исполнению

М.О. Дутов

подпись, инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 История жаропрочных сплавов .....	7
2 Характеристика жаропрочных сплавов. Общие сведения .....	14
3 Классификация используемых жаропрочных сплавов их применение.....	15
3.1 Деформируемые жаропрочные сплавы.....	24
3.2 Литейные жаропрочные сплавы .....	27
4 Синтез жаропрочных сплавов.....	32
5 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки жаропрочных сплавов.....	43
5.1 Индукционные плавильные печи .....	43
5.2 Подготовка используемых отходов при плавке .....	50
6 Изготовление форм и стержней.....	53
6.1 Современные методы изготовления форм и стержней .....	53
6.2 Щелочные полифеноляты, отверждаемые жидкими и газообразными сложными эфирами (ALPHA-SET- и BETA-SET- процессы) .....	62
7 Разработка технологии производства отливок из сплава 40X24H12СЛ.....	76
7.1 Характеристика отливки представителя.....	77
7.2 Конструирование литниково-питающей системы с применением программ моделирования .....	80
8. Выбор основного оборудования и определение технологических операций, необходимых для изготовления отливок .....	95
9 Расчёт норм расхода основных материалов .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108

## ВВЕДЕНИЕ

Ни кому не секрет, что сегодня машиностроение является одной из важнейших составляющих экономики практически каждой страны. Отдельным отраслям этой промышленности присущи различные темпы развития. Наибольшую удельную долю отраслей в общем объеме машиностроительного производства составляет автомобильная отрасль - 54%, которая развивается темпами современного инновационного мира. Не менее важное производство является электротехническая - 16%; тяжелое и энергетическое машиностроение - 8%; химическое и нефтяное машиностроение - 5%; дорожное и коммунальное машиностроение - 2,5%; станкостроение и приборостроение 1,5%. В каждой из выше перечисленных отраслей неотъемлемое место занимает литейное производство, которое представляет собою трудоемкий технологический процесс занимающийся изготовлением фасонных заготовок или деталей путем изменения формы, размеров, качеств металлов и сплавов. Именно литейное производство позволяет нам получить детали сложной конфигурации с минимальными припусками на обработку резанием и с хорошими механическими свойствами. С каждым днем технологический процесс литейного производства совершенствуется инновационными идеями ученых мирового значения.

Жаропрочное литье основано на производстве жаростойких и жаропрочных отливок и деталей. Жаропрочное литье отличается от обычного применением сталей и чугуна специальных марок, с добавлением хрома, никеля, вольфрама, молибдена и кобальта.

Такое литье предполагает изготовление изделий, адаптированных для эксплуатации в температурном режиме от 1000 °С либо для работы в условиях действия агрессивных горячих сред.

К жаропрочным сплавам предъявляют достаточно сложный комплект требований: хорошая технологичность, высокая прочность во всем диапазоне рабочих температур, высокое сопротивление малоциклового усталости, стабильность структуры и фазового состава сплава. К группе жаростойких (окалиностойких) отнесены сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550 °С, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии.

Основными химическими элементами жаропрочных сплавов являются никель и хром, которые придают сплавам высокотемпературную прочность и окалиностойкость. Добавками в сложнолегированных никелевых сплавах могут служить: хром, кремний, молибден, алюминий, медь, вольфрам, кобальт и другие элементы.

Жаропрочные сплавы на основе никеля применяются во многих отраслях промышленности, среди которых машиностроение, авиационная и ракетно-

космическая отрасль теплоэнергетика, нефтедобывающая и нефтехимическая промышленность. Жаропрочные сплавы ещё используют для изготовления элементов газовых и реактивных турбин, котлов, матриц горячей штамповки, двигателей и аппаратуры, эксплуатируемой в условиях интенсивных высоких нагрузок и экстремальных температур в медицине и т.д.

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

Цель работы: Изучить особенности синтеза сплавов и разработать технологию производства отливок из жаропрочных сплавов с использованием программы моделирования LWMFlowCV.

Задачи: Изучить свойства жаропрочных сплавов, обладающих высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред. Выбрать современное оборудование и технологию для изготовления отливок. При разработке технологии использовать программу моделирования литейных процессов.

## 1 История жаропрочных сплавов

История жаропрочных сплавов началась с создания в середине 40-х годов в Англии первого дисперсионно-твердеющего никелевого сплава Нимоник 80, из которого методом штамповки изготавливали рабочие лопатки газовых турбин.

В 50-е годы специалистами ВИАМ было показано, что наибольшую перспективу повышения уровня жаропрочности лопаток открывают не деформируемые, а литейные сплавы, новый литейный цех указан на рисунке 1. Технология литья по выплавляемым моделям является практически единственным способом получения охлаждаемых лопаток, имеющих сложную геометрию внутренней полости. Это новое направление в развитии жаропрочных сплавов для изготовления рабочих лопаток газовых турбин с запозданием на пять лет было принято и в странах Запада [1].



Рисунок 1 – Участок индукционных печей сталелитейного цеха ВИАМ (1950 г.)

В 60-х годах разработаны первые серийные отечественные литейные жаропрочные сплавы ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12У, позволившие создать литые охлаждаемые турбинные лопатки с равноосной структурой и повысить их рабочую температуру на 200°С по сравнению с рабочей температурой лопаток из лучшего на тот период деформируемого сплава ЭИ437Б.

В 70–80-х годах совершенствование литейных жаропрочных никелевых сплавов происходило путем улучшения методов выплавки, применения

шихтовых материалов повышенной чистоты, использования новых легирующих добавок и создания специальных жаропрочных сплавов для литья турбинных лопаток с направленной и естественно-композиционной монокристаллической структурой. Первыми отечественными сплавами данного класса стали сплавы ЖС26, ЖС30, ЖС32, ЖС36, ЖС40, ВКЛС-20, ВКЛС-20Р.

В 90-х годах созданы коррозионностойкие жаропрочные сплавы длительного ресурса ЖСКС1 и ЖСКС2 для лопаток, включая крупногабаритные, с направленной и монокристаллической структурой.

С начала 2000 года по настоящее время развитие жаропрочных никелевых сплавов связано с созданием монокристаллических высокорениевых жаропрочных сплавов третьего поколения ВЖМ1 (9,3%Re), ВЖМ2 (12%Re), ЖС55 (9%Re) и ВЖМ5 (4%Re). Для стабилизации фазового состава высокорениевые жаропрочные никелевые сплавы предложено легировать рутением. В связи с этим за истекшие 10 лет в ВИАМ были выполнены важные теоретические работы и получены многочисленные экспериментальные результаты, касающиеся разработки и исследования новых более жаропрочных монокристаллических никелевых рений-рутений содержащих сплавов четвертого (ВЖМ4) и пятого (ВЖМ6) поколений [1]. Первая вакуумная индукционная печь ВИАМ 100 (рисунок 2) для плавки 100 кг металла была установлена и пущена в эксплуатацию в ВИАМ в середине 50-х годов

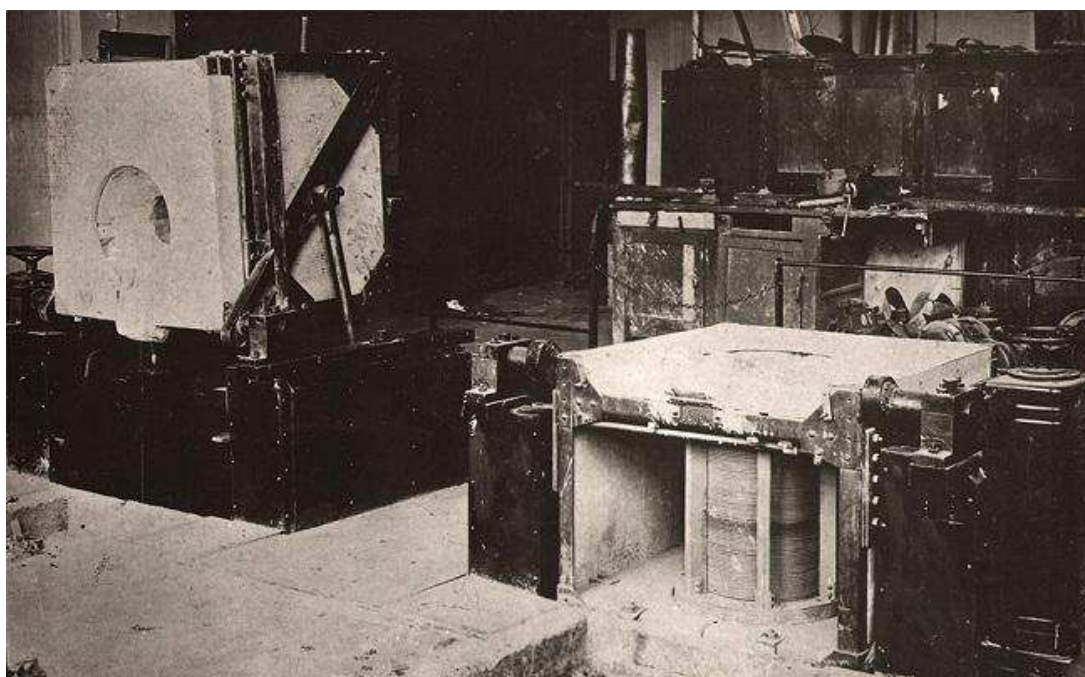


Рисунок 2 – Индукционные печи открытого типа для выплавки первых жаропрочных никелевых сплавов



Бурное развитие реактивной авиации потребовало создания не только принципиально новых классов сталей и сплавов, но и металлургических технологий, обеспечивающих возможность получения и необходимого качество этих материалов. Металлургическая лаборатория ВИАМ, созданная в 1936 году, внесла решающий вклад в разработку технологий, ставших основой современного производства авиационных сталей и сплавов: вакуумной индукционной плавки (ВИ), вакуумного дугового переплава (ВДП), электрошлакового переплава (ЭШП) и др. [1].

.Это стало возможным благодаря организации в ВИАМ конструкторского бюро по проектированию и изготовлению вакуумного плавильного оборудования. В дальнейшем были введены в эксплуатацию установки ОКБ-736 и ИСВ 0,16 (рисунок 3), что позволило расширить объем работ по разработке технологий выплавки в вакууме различных классов сталей и сплавов [1].



Рисунок 3 – Печь ОКБ-736 (разработка ВИАМ–ВНИИЭТО, 1967 г.)

Разработаны и переданы в серийное производство на металлургические заводы («Электросталь», ЧМК, ЗМЗ и др.) технологии: ВДП жаропрочных дисковых сплавов (ЭИ437БУ, ЭИ698), ВИ+ВДП высокопрочных мартенситостареющих сталей (ВКС-180, ВКС-210), высокожаропрочных дисковых (ЭП742, ЭК79, ЭП975) и свариваемых (ЭП648, ВЖ145, ЭП718) сплавов; ЭШП высокопрочных коррозионностойких сталей (ЭП310, ЭП817, ВНС-65 и др.).

Разработаны технологии вакуумной индукционной плавки и переданы на Ступинский металлургический комбинат, где организовано производство литейных жаропрочных сплавов (ЖС6У, ВЖЛ12У, ЖС6К и др.) для лопаток ГТД с равноосной структурой и первого отечественного ренийсодержащего сплава ЖС32 для монокристаллических лопаток.

В 2000-х годах в ВИАМ разработаны технологии выплавки литейных супер жаропрочных сплавов нового поколения для монокристаллических лопаток авиационных ГТД (рисунок 4): рений- и рутенийсодержащих никелевых сплавов (ЖС36, ВЖМ4, ВЖМ5), интерметаллидных сплавов (ВКНА-1В, ВКНА-1ВР), в том числе ренийсодержащего интерметаллидного сплава ВКНА-25, создано их серийное производство, обеспечивающее гарантированное качество литой прутковой (шихтовой) заготовки по стабильности химического состава, чистоте по примесям, качеству поверхности заготовок и свойствам на уровне лучших зарубежных суперсплавов. Разработана ресурсосберегающая технология производства серийных жаропрочных сплавов (ЖС32, ЖС26, ЖС6У, ВЖЛ12У и др.) путем рафинирующего переплава 100% всех видов литейных отходов моторных заводов, в том числе некондиционных (рисунок 5), обеспечивающая качество литой прутковой заготовки в полном соответствии с требованиями ТУ и аналогично качеству продукции, изготовленной на металлургических заводах из «свежих» шихтовых материалов, при этом стоимость ее на 30–50% ниже (рисунок 6).



Рисунок 4 – Участок выплавки жаропрочных никелевых сплавов до (1998 г.) и после реконструкции (2001 г.)

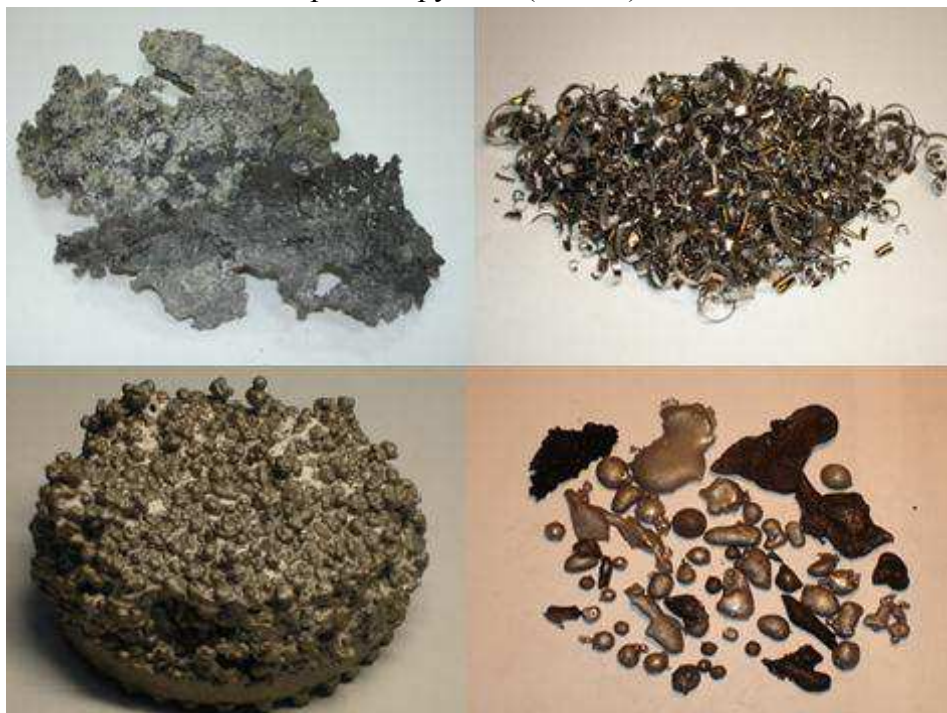


Рисунок 5 – Некондиционные отходы жаропрочных сплавов (стружка, металлокерамика после фильтрации, сплеси и корольки после разливки)



Рисунок 6 – Внешний вид литых прутковых заготовок

Во ФГУП «ВИАМ» создан специализированный производственный участок, оборудованный современным автоматизированным плавильным,

аналитическим и испытательным оборудованием, по серийному производству высокожаропрочных литейных сплавов.

Выплавка сплавов производится в современных вакуумных индукционных печах VIM 50 (емкость тигля 350 кг) и VIM 150 (емкость тигля 650 и 1000 кг), которые были изготовлены по техническому заданию ФГУП «ВИАМ» (рисунок 7).



Рисунок 7 – Вакуумная индукционная печь VIM 150  
(емкость тигля 650 и 1000 кг)

Разработаны и успешно осваиваются совместно с ОАО МЗ «Электросталь» технологии производства супержаропрочных деформируемых сплавов для дисков (ВЖ175) и деталей горячего тракта (ВЖ159, ВЖ172) ГТД, собственное производство элинварных сплавов (ВУС-22, ВУС-12 и др.), высокопрочной бериллийсодержащей стали (ВНС-32), деформируемого износ- и коррозионностойкого медно-никелевого сплава (ВКМ1).

С 2010 года активно ведутся работы по созданию производства мелкодисперсных металлических порошков распылением расплава инертным газом на установке HERMIGA10/100VI. Разработаны и освоены технологии получения порошков более 10 марок никелевых (ВПр24, ВПр50, ВПр36, ВПр42, ВПр44 и др.) и титановых (ВПр16 и ВПр28) припоев (10–200 мкм). Начаты серийные поставки припоев моторным заводам. Ведутся работы по получению мелкодисперсных порошков для аддитивных технологий. Порошки для лазерной LMD-наплавки (40–80 мкм) поставляются в ОАО «Авиадвигатель», на котором проводятся работы по отработке технологий

наплавки бородок бандажных полок лопаток ТВД. Ведутся работы по получению порошков для селективного лазерного сплавления (20–40, 10–50 мкм). В 2014 году приобретена установка для селективного лазерного сплавления металлических порошков, позволяющая получать детали практически любой сложности внутреннего строения напрямую из металлических порошков без использования какой-либо (литейной, прессовой) оснастки. Начаты исследования в области получения деталей по полному циклу «порошок–синтез–ГИП», что обеспечит в дальнейшем ускорение внедрения аддитивных технологий в производство [1].

## **2Характеристика жаропрочны 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 [2].

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 [2].

Кратковременная прочность определяется с помощью испытаний на растяжение разрывных образцов. Образцы помещают в печь и испытывают при заданной температуре. Обозначают кратковременную прочность, например,  $300^{\circ}\text{C} = 300\text{МПа}$  [2].

Прочность зависит от продолжительности испытаний.

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

Например,  $200\text{МПа}$ , 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  $0,6\text{Тпл}$ , когда протекают процессы разупрочнения, и при напряжениях выше предела упругости наблюдается ползучесть [2].

В зависимости от температуры скорость деформации при постоянной нагрузке выражается кривой, состоящей из трех участков (рисунок 8) [2].

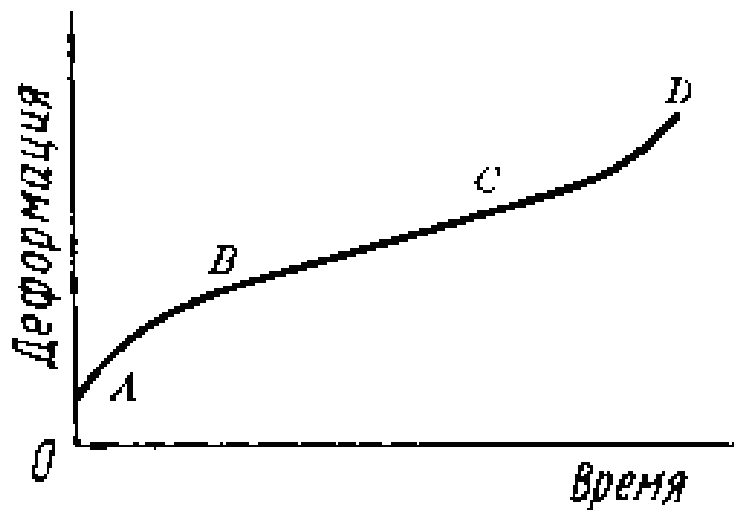


Рисунок 8– Кривая ползучести

OA – упругая деформация образца в момент приложения нагрузки;  
 AB – участок, соответствующий начальной скорости ползучести;  
 BC – 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 [2].

Предел ползучести – напряжение, которое за определенное время при заданной температуре вызывает заданное суммарное удлинение или заданную скорость деформации [2].

### **3 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 %) [3].

### **Стали перлитного класса**

Среди низколегированных сталей высокой жаропрочностью отличаются молибденсодержащие стали, например, хромо-молибденовые, хромо-молибдено-ванадиевые, хромо-молибдено-вольфрамо-ванадиевые, имеющие достаточно высокие сопротивление ползучести и длительную прочность при температурах до 565–580 °С. Такие стали условно называют теплоустойчивыми.

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 [4].

### **Стали мартенситного класса**



Стали мартенситного класса содержат 4,5–12 % Cr, а также в значительно меньшем количестве Ni, W, Mo, V.

Стали марок 15X5, 15X5М, 15X5ВФ и 15X8ВФ широко применяют для изготовления элементов аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов – деталей насосов, задвижек, крепежных деталей, крекингowych труб, работающих при температурах 550–600 °С. Стали этой же группы с более высоким содержанием Cr (6–10 %) и с повышенным содержанием Si (2–3 %), в основном, применяют для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания.

Сталь 11X11Н2ВМФ применяют для дисков компрессоров и для других деталей, работающих при температурах до 600 °С с ограниченным сроком службы [5].

### **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 °С у стали 18X12ВМБФР.

Эти стали изготавливают в виде сортового проката и применяют в турбостроении для лопаток и дисковступеней турбин, а также для крепежных деталей. Ориентировочная рабочая температура для стали 15X12ВНМФ — 550–580 °С и 570–600 °С — для стали 18X12ВМБФР [6].

### **Стали аустенитного класса**

Стали аустенитного класса – в основном хромоникелевые стали с содержанием Cr и Ni в пределах от 7 до 25 % каждого, наряду с которыми присутствуют W, Mo, Ti, Nb и др. На рисунке 9 показана структура аустенита.

Это самая многочисленная группа жаропрочных сталей (см. ГОСТ 5632–72)[7]. В таблице 1 и 2 указаны основные характеристики и механические свойства сплавов аустенитного класса.

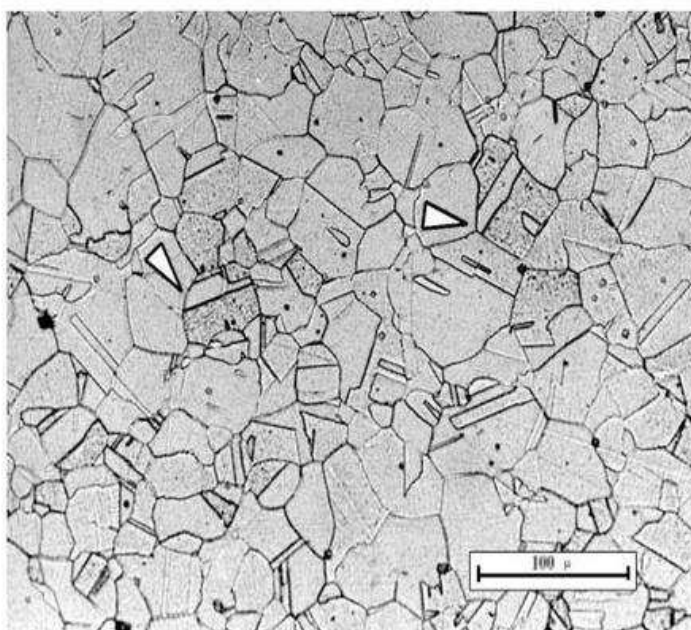


Рисунок 9 – Структура аустенита

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>
12MX	Перлитный	420	260	21	45	60
15XM		450	280	20	45	70
12X1MФ		480	260	21	55	100
20XM		800	600	12	50	90
25X1MФ		900	750	14	50	60
25X2M1Ф		900	750	10	40	30
18X3MB		650	450	18	–	120
20X3MBФ		900	750	12	40	80
15X5M	Мартенситный	450	220	20	50	120
15X5		400	170	24	50	100
15X5BФ*		400	220	22	50	120
40X9C2*		750	500	15	35	–
40X10C2M		950	750	10	35	> 20
15X11MФ		755	568–755	14	50	59
18X11MHФБ		740	590–735	15	50	59
20X12BHMФ		740	590–755	14	45	54
30X13H7C2		1200	800	18	25	> 20
11X11H2B2MФ		900	750	12	50	80
16X11H2B2MФ	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	–	–
09X14H19B2БP	500	220	38	50	140
09X14H19B2БP1	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>
31X19H9MBT	680	350	25	25	70
55X20H4AG9M	1000	650	8	10	–
20X20H14C2	600	300	35	30	–
20X23H13	500	300	35	50	–
20X23H18	500	200	35	50	–
20X23H18	540	265	35	–	–
20X25H20C2	600	300	35	50	–

### Сплавы на железо-никелевой основе

Сплавы на железо-никелевой основе 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 (таблице 2). Сплавы второй группы благодаря повышенному содержанию Cr жаростойкие, по жаропрочным свойствам они уступают сплавам первой группы, например, сплав ХН38ВТ.

Сплавы ХН35ВТ, ХН35ВМТ, ХН35ВТЮ поставляют преимущественно в виде горячекатаных и кованых 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 железо-никелевой основе (рисунок 10) применяют для изготовления деталей паровых и газовых турбин[8].



Рисунок 10 – Сплавы на железо-никелевой основе

## Сплавы на никелевой основе

Сплавы на никелевой основе (рисунок 11) подразделяют на две группы (см. 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.

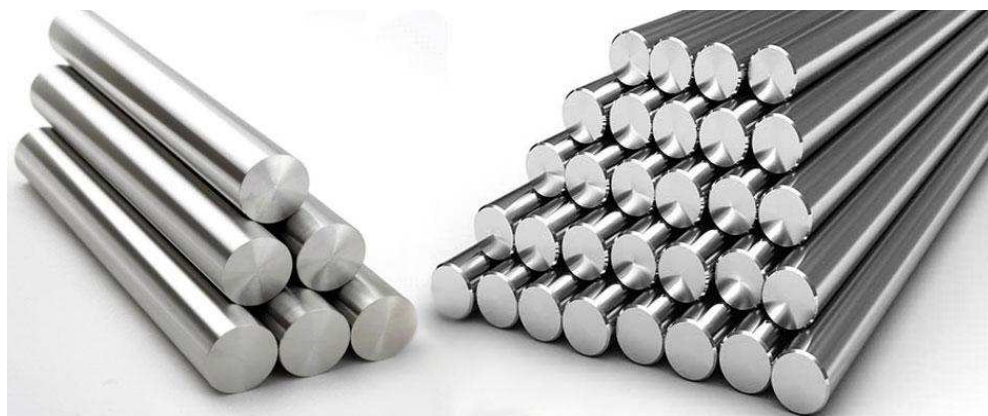


Рисунок 11 – Сплавы на никелевой основе

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, Se, 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.

Жаропрочные никелевые сплавы изготавливают в виде сортового проката (прутки круглого сечения) и частично в виде поковок различной конфигурации [9].

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 %.

На рисунке 12 приведены характеристики механических свойств широко применяемого в авиации сплава ХН77ТЮР при кратковременном нагружении при температурах 500–900 °С. Зависимость длительной прочности этого сплава и его модификации без бора ХН77ТЮ от времени дана на рисунке [3].

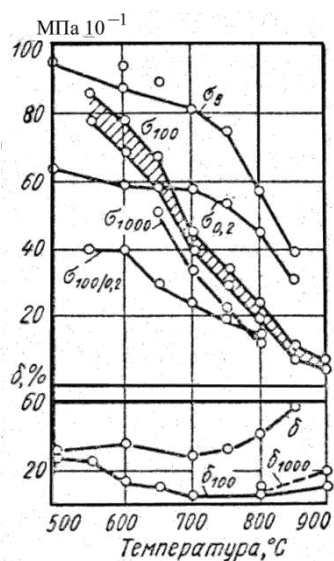


Рисунок 12 – Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮР от температуры

### **Сплавы на кобальта-никелевой основе**

Дополнительное легирование никелевых сплавов кобальтом повышает их жаропрочные свойства, а также улучшает технологическую пластичность. Содержание кобальта должно быть достаточно высоко. Так, в отечественных марках таких сплавов содержание кобальта варьируют от 5 до 15 %, в зарубежных — 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 кобальта-содержащих сплавов. У всех этих сплавов высокое содержание алюминия (4,5–6 %), причем первые три сплава не содержат титана.

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. Совершенствование технологии литья и многокомпонентного легирования обеспечило существенное увеличение рабочей температуры сплавов, причем направленные и монокристаллические сплавы группы ЖС стали более пластичными (рисунок 13). Предельные рабочие температуры нагрева деформируемых сплавов не превышают 1000 °С [10].

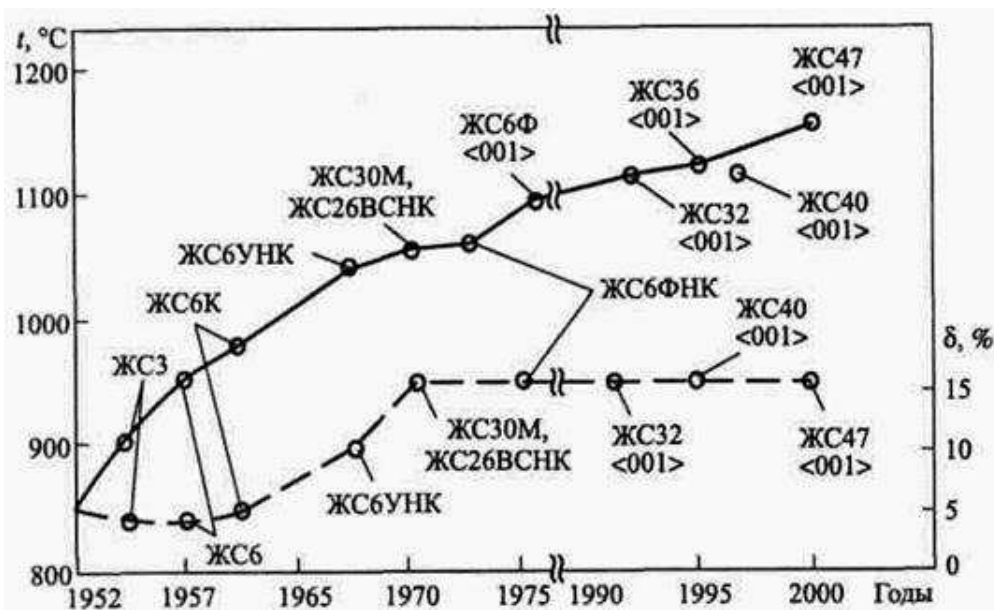


Рисунок 13 – Повышение рабочей температуры (сплошная линия) и пластичности (штриховая линия) литейных жаропрочных никелевых сплавов для лопаток турбин

### 3.1 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 (рисунок 14).



Рисунок 14 – 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 (рисунок 15).



Рисунок 15 – 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 и будут использованы в перспективных ГТД.

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

**ВЖ159** – высокотехнологичный свариваемый ремонтпригодныйслабостареющий сплав с рабочими температурами до 1000°С 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 для высокотемпературных статорных деталей ГТД (жаровых труб, створок, экранов, сопла и т. д.). Микроструктура сплава представлена на рисунке 16.

**ВЖ172** – высокопрочный свариваемый дисперсионно-твердеющий сплав для роторов КВД, корпусов и высоконагруженных деталей статора ГТД (рисунок 17).

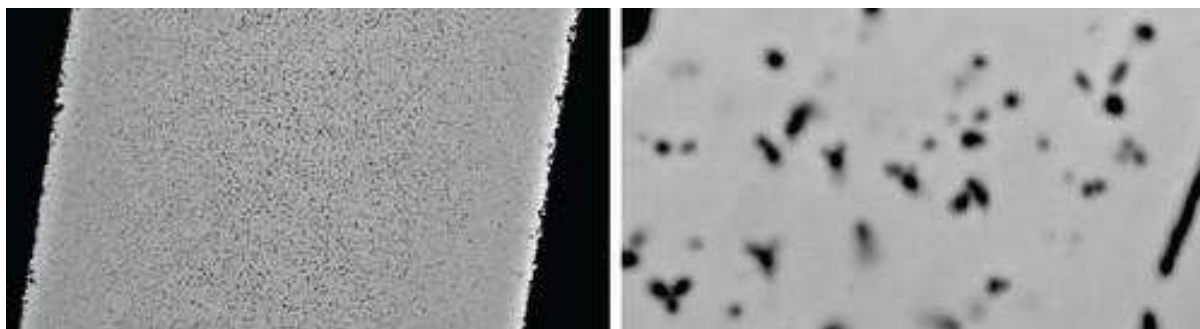


Рисунок 16 – Микроструктура сплава ВЖ171



Рисунок 17 – 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 (таблица 3) [11].

Таблица 3 – Механические свойства деформируемых жаропрочных сплавов

Сплав	Рабочая температура, °С	Содержание фазы % по массе	МПа	%	МПа			
					МЦУ: (при $N=104$ цикл; $f=1$ 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

### 3.2 Литейные жаропрочные сплавы

Жаропрочные сплавы (таблица 4) обладают хорошими литейными свойствами - высокой жидкотекучестью, малой склонностью к газовой пористости, небольшой линейной и объемной усадкой (2–3 %).

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 с монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1170°С. Сплав ВЖМ4 внесен в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21.

**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°С (рисунок 18) [11].



Рисунок 18 – 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°С.

**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 (таблице 5).

Таблица 5 – Прочностные свойства литейных жаропрочных сплавов

Сплав	d, кг/ м <sup>3</sup>	$\sigma_{В 20^\circ}$ МПа	$\delta, \%$	$\sigma 100^{900^\circ} /$	$\sigma 100^{1000^\circ} / \sigma$	$\sigma 100^{1100^\circ} / \sigma$	$\sigma 100^{1150^\circ} / \sigma$
				$\sigma 1000^{900^\circ}$	$1000^{1000^\circ}$	$1000^{1100^\circ}$	$1000^{1150^\circ}$
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		

Интерметаллидные материалы на основе Ni<sub>3</sub>Al представляют интерес для применения в деталях камер сгорания с рабочей температурой до 1300°С, турбин – в качестве сопловых охлаждаемых лопаток (рисунок 19), створок регулируемого сопла, проставок с рабочей температурой до 1200°С.

**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°С в течение 2000 ч на двигателях ПС-90А (ОАО «Авиадвигатель») и 117А (ОАО «НПО Сатурн»).

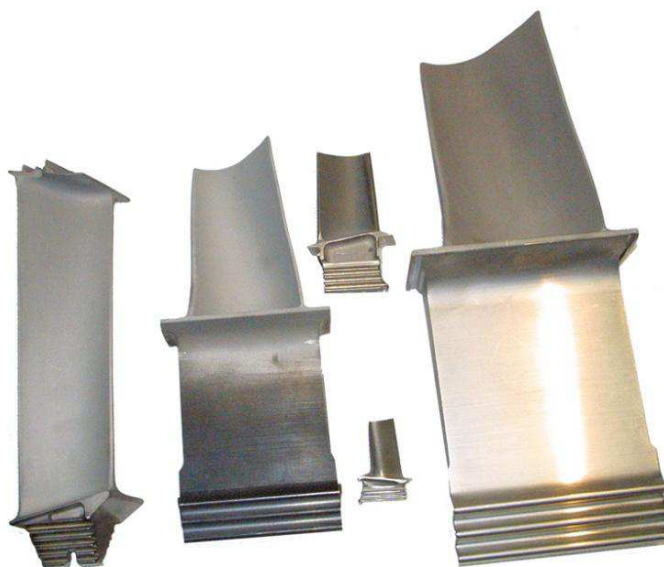


Рисунок 19 – Рабочие лопатки из жаропрочных сплавов

**ВКНА-4УМоно** – сплав прошел технологическое опробование 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 (рисунок 20).



Рисунок 20 – 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»(рисунок 21).



Рисунок 21 – Сопловой аппарат из сплава ВКНА-4УР

**ВКНА-25** – сплав прошел эксплуатационное опробование с положительным эффектом в составе малогабаритного двигателя МД-120 на предприятии ФГУП "НПЦ Газотурбостроения «Салют» (рисунок 22).

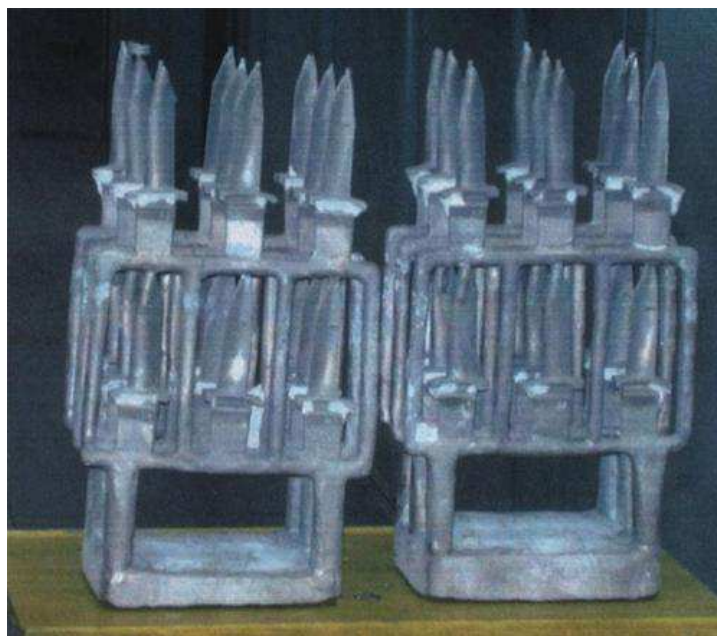


Рисунок 22 – Внешний вид двухъярусного блока рабочих лопаток малогабаритного двигателя из сплава ВКНА-25

**ВКНА-1В** и **ВКНА-4У** – сплавы внесены в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21 (рисунок 23) [11].



Рисунок 23 – Сопловой лопатка из сплава ВКНА-4У

Прочностные свойства интерметаллидных сплавов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Прочностные свойства интерметаллидных сплавов

Сплав (КГО)	Сумма лигирующих 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	
					$\sigma_{\text{в } 20^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ}$		
							МПа	
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

#### 4 Синтез жаропрочных сплавов

Сплавы возникают, применяются, развиваются и умирают. В настоящее время количество вновь создаваемых сплавов растет быстрее, чем количество сплавов, производство которых прекратилось. Рост числа материалов, как и других показателей современной научно-технической революции, обуславливается следующими основными факторами:

– быстрым повышением параметров техники (рабочих температур, скоростей, давлений, агрессивных сред, мощностей, сосредоточенных в одном



агрегате, и в то же время микроминиатюризации), требующим увеличения уровня свойств материалов;

- усложнением машин, приборов и объединением в их узлах разнообразных функций, требующим разнообразия и сочетания часто противоречивых свойств;

- возникновением принципиально новых отраслей техники (космическая, полупроводниковая, атомная, сверхпроводниковая, лазерная и др.), требующим совершенно новых материалов, которые в предшествующую эпоху просто не существовали.

Наряду с новой техникой в огромных масштабах изготавливаются изделия традиционной техники, не требующие высокого уровня свойств, но требующие дешевизны и высокой технологичности, особенно в условиях массового и автоматизированного производства.

Традиционное металловедение фактически не ставит перед собой задачи создания новых сплавов, хотя в практике работы металловеды вынуждены заниматься этими вопросами во все-возрастающем масштабе.

В общем виде задача о создании нового сплава может быть сформулирована следующим образом.

Дано: периодическая система элементов Менделеева и все необходимые данные о свойствах элементов, в том числе их технико-экономические характеристики.

Условия: разрабатываемый сплав должен обладать определенным комплексом свойств. Эти свойства делятся на три категории.

- главное свойство, которое должно иметь оптимальное значение (прочность, устойчивость против коррозии, цена, технологичность).

- ограничения, которые оговаривают, что ряд других свойств должны быть не меньше (или не больше) определенных значений (ударная вязкость, концентрации дефицитных легирующих элементов, цена сплава, токсичность и др.).

- требования к «натурным» свойствам. Обычно свойства первых двух категорий определяются на образцах и технологических пробах. Однако современной технике таких испытаний недостаточно. Требуется проверка технологичности сплава в реальных производственных условиях и рабочих свойств на режимах повышенной нагрузки.

Требуется: найти состав сплава и режим его термической обработки, обеспечивающие выполнение всех этих условий.

Круг методов, привлекаемый для решения этих задач, целесообразно связать с определенным понятием. Для этого применяются следующие термины:

– разработка сплава. Понятие обозначает затрату труда, энергии, работы, направленной на изучение предмета, но не выражает сущности решаемой задачи.

– выбор сплава. Понятие подразумевает, что имеется ряд объектов, намеченных для исследования, и из них выбирается наилучший. Такое определение справедливо только для метода проб и ошибок, не единственного и далеко не лучшего.

– проектирование сплава с заранее заданными свойствами. Проектирование означает составление чертежей, документов, смет, образующих комплект документов, необходимых для создания какого-либо сооружения. Однако в это понятие не входит проведение опытов, без которых создание сплавов пока не мыслимо. Кроме того, «заранее заданные свойства» могут оказаться физически не осуществимыми.

– оптимизация сплава. Это операция выбора наилучшего состава сплава внутри некоторой области концентраций ограниченного числа заданных легирующих элементов. Она составляет важную, но не единственную часть задачи.

– создание сплава. Термин предполагает, что в данной области ничего раньше сделано не было. В настоящее время не-возможно найти среди сплавов область, о которой ничего не было бы известно.

– синтез сплавов. В 1968 г. на совещании, посвященном основам образования литейных сплавов, автором был предложен этот термин. Слово синтез обозначает объединение. Если классическое металловедение фактически решало задачу анализа, т.е. отвечало на вопрос, почему существующие сплавы имеют те или иные свойства, то синтез сплавов должен отвечать на вопрос, какой состав должен иметь сплав, отвечающий определенным свойствам. За последнее время этот термин получил некоторое применение. Представляется, что он правильно передает смысл задачи.

Методы, которые применялись и применяются в синтезе сплавов, можно разделить на следующие группы [11].

Метод проб и ошибок. В имеющуюся основу вводят последовательно различные элементы; сначала по одному, затем в виде групп из двух, трех или большего числа. Элементы, отрицательно влияющие на свойства, сразу же отбрасываются, а композиции из элементов или их групп, которые дают хорошие результаты, сохраняются; сплав, давший наилучшие результаты из подвергавшихся исследованиям, считается оптимальным. Выбор легирующих

элементов основывается на априорной информации. При скольких-нибудь значительных количествах элементов, из которых производится выбор сплавов, число требуемых опытов возрастает в колоссальной степени. Этим определяется ограниченность метода. Хорошо зарекомендовавшие себя сплавы продолжают совершенствоваться; в них вводят добавки новых элементов. Происходит их естественный отбор. Поскольку вся эта работа фактически производится в сфере металловедения и всегда сопровождается изучением структур сплавов, метод может быть назван также металловедческим.

**Металлофизические методы.** Металлофизика возникла в 30-х годах нашего века. Она ставила своей задачей изучение металлов и сплавов средствами экспериментальной и теоретической физики на основе данных об их атомно-кристаллическом строении. Несмотря на интуитивно ожидаемую перспективность, металлофизические методы пока не дают конкретных результатов, хотя их отдельные качественные положения являются полезными уже сейчас.

**Статистические методы.** Начиная с 20-х годов проводилось большое количество пассивных статистических исследований, основанных на обработке производственного опыта. Однако небольшой интервал случайных колебаний состава сплавов в промышленных условиях и невозможность введения в них новых компонентов сводит на нет возможность синтеза новых сплавов этим методом.

**Системный подход.** Совокупность взаимодействий любых комбинаций элементов в любых концентрациях с данной основой можно рассматривать как систему. Последовательный перебор всех комбинаций из элементов системы опытным путем неосуществим. Когда задача системного анализа не решается в лоб, можно применить метод редукции, т.е. разбить ее на несколько более простых, которые можно решать по отдельности, каждую из них наиболее подходящим методом. Сумма этих решений дает решение всей задачи.

Произведем разбиение задачи о синтезе сплавов на следующие подзадачи (рисунок 24).

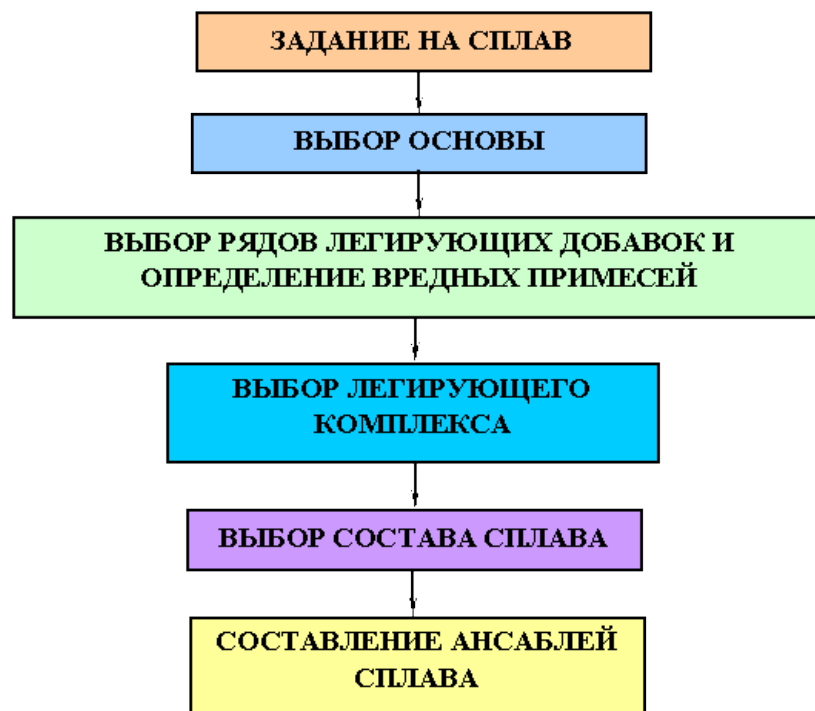


Рисунок 24- Схема синтеза сплавов

- формулировка задания на сплав.
- выбор основы сплава.
- выбор рядов легирующих элементов и вредных примесей, основывающийся на парных взаимодействиях основы и остальных элементов периодической системы. Сюда же входят их отсеивание по экономическим показателям и оценка влияния добавок и примесей на технологические свойства сплавов.
- выбор легирующего комплекса, включающего в себя группу членов рядов легирующих элементов, которые должны вводиться совместно.
- выбор состава сплава. На этом этапе решается задача о выборе такого конкретного содержания каждого члена легирующего комплекса, который обеспечил бы наивысший возможный уровень основного свойства. Окончательное решение о внедрении сплава принимается только после его производственного и эксплуатационного опробования.
- составление ансамблей сплавов. Сплавы на отдельных основах, для отдельных назначений, в зависимости от легирующих комплексов могут иметь разнообразные свойства. В дальнейшем целесообразно составить из них группы с определенными уровнями основных свойств. На каждом уровне должны остаться наиболее дешевые сплавы с различными вариантами второстепенных свойств и взаимозаменяемыми легирующими элементами в зависимости от хозяйственной ситуации. Создание таких ансамблей – дело будущего.

Технический прогресс в области турбореактивного двигателестроения определяется, прежде всего, повышением рабочих температур газовых турбин. Однако параметры работы турбин ограничиваются характеристиками жаропрочных материалов, применяемых для изготовления рабочих лопаток. Рабочие лопатки изготавливаются, в основном, методом направленной кристаллизации из литейных никелевых жаропрочных сплавов. Сложность конфигурации лопаток, в частности, наличие внутренних полостей, делает литье не только экономичным, но и единственно возможным методом их получения. Кроме того, литейные жаропрочные сплавы, состав которых не ограничивается условиями хорошей обрабатываемости при пластической деформации, могут иметь более высокую степень легирования, а, следовательно, и повышенную жаропрочность. В результате достигается преимущество в жаропрочности примерно на 45 ... 60 % по сравнению с деформируемыми жаропрочными сплавами. Наиболее распространенные в практике отечественного авиадвигателестроения лопаточные сплавы ЖС6-К и ЖС6-У, ЖС26 и ЖС32 имеют пределы 100-часовой длительной прочности при 1000° С не более 150 ... 180 МПа и 200 ... 255 МПа, а при 1050°С - 80 ... 110МПа и 125 ... 180 МПа соответственно. Эти свойства уже не удовлетворяют в полной мере современным условиям эксплуатации ГТД в связи с требованиями значительного увеличения ресурса и повышения рабочей температуры. Поэтому работы в области создания новых жаропрочных сплавов отнесены к приоритетным направлениям фундаментальных исследований [12]. Методика синтеза сплавов (рисунок 25) методами математического моделирования заключается непосредственно в разработке самих математических моделей влияния легирующих элементов на жаропрочность.

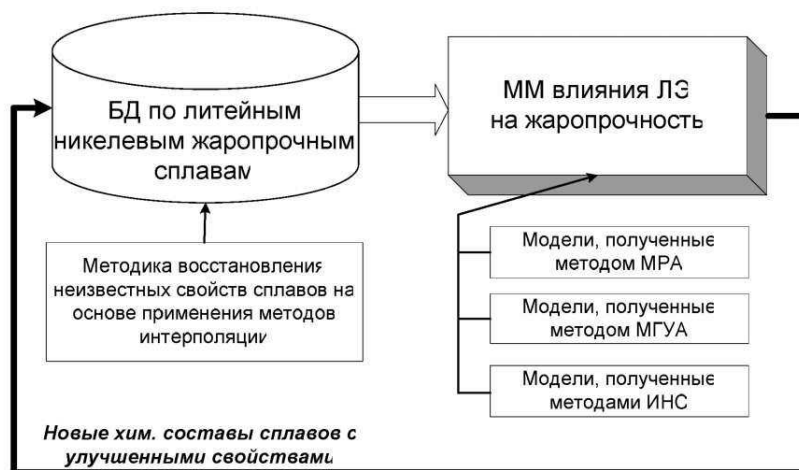


Рисунок 25 – Общая методика синтеза сплавов на основе методов математического

С точки зрения построения математических моделей «состав-свойство» был рассмотрен ряд методов — это методы распознавания образов, множественного регрессионного анализа (МРА) и интеллектуальные методы — метод группового учета аргументов (МГУА) и искусственных нейронных сетей (рисунок 26).

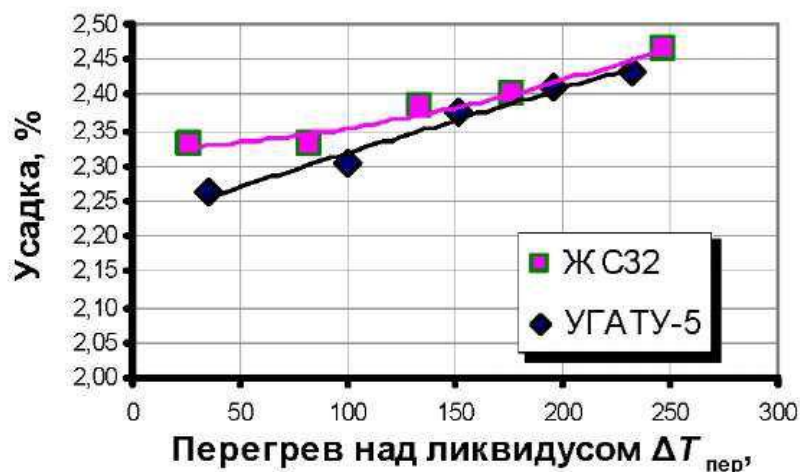


Рисунок 26 – Зависимость линейной усадки сплавов от перегрева над температурой ликвидус

Методы распознавания образов эффективны лишь на первоначальном этапе исследования — когда есть необходимость группировки данных по какому-то признаку, например, в методе группового учета аргументов при формировании обучающей и контрольной выборок, где сплавы с максимальными свойствами используются для проверки модели на заключительном этапе алгоритма.

Метод множественной регрессии позволяет оценить влияние легирующих элементов по отдельности, что оказывается полезным при формировании моделей более сложными интеллектуальными методами, каковыми являются МГУА и ИНС.

Таким образом, для решения данной задачи наиболее подходящими методами являются МРА и эвристики, которые требуют систематизированной исходной информации.

Таким образом, предлагаемая новая методика проектирования литейных жаропрочных сплавов для получения отливок с монокристаллической структурой, основанная на использовании априорной информации о составах и свойствах известных сплавов, позволяет в 3-4 раза сократить сроки создания многокомпонентных сплавов, сэкономить расходование дорогостоящих материалов и значительно снизить трудозатраты. Комплексное применение различных математических методов и методов искусственного интеллекта

позволяет получать наиболее адекватные математические зависимости вида «состав-свойство», прогнозировать жаропрочность и получать новые составы сплавов. Автоматизированное проектирование сплавов позволяет существенно ускорить процесс разработки новых материалов, сделать его менее затратным, избегая многократного проведения опытов (рисунок 27) [12].

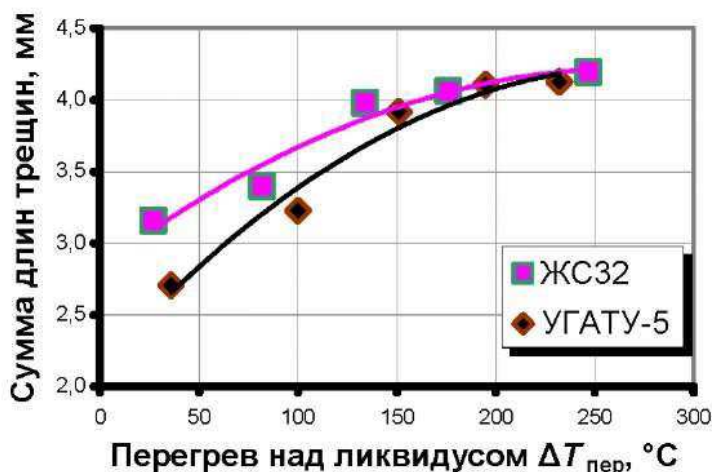


Рисунок 27 – Зависимость трещинопоражаемости сплавов от перегрева над температурой ликвидус

Поскольку в лопатках с монокристаллической структурой отсутствуют большеугловые границы зерен, то отпадает необходимость вводить в ЖНС легирующие элементы (С, В, Zr, Hf), упрочняющие границы зерен. И хотя в сплавах традиционного легирования содержание этих элементов невелико, исключение их из химического состава и оптимизация легирующего комплекса, включающего W, Mo, Ti, Cr, Co и др., приводят к значительному изменению свойств монокристаллических сплавов (фазовый состав, температура фазовых превращений и механические свойства). В частности, отсутствие углерода и бора существенно повышает температуру плавления (до 1360°C), сопротивление ползучести, а также механической и термической усталости, поскольку не образуются карбиды и бориды. Таким образом, фазовый состав монокристаллических ЖНС состоит из сложнoleгированного  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля и интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы.

Постоянное стремление повысить жаропрочные свойства за счет легирования привело в конце 80-х годов прошлого века к разработке монокристаллических сплавов, содержащих (до 3 мас. %) новый легирующий элемент – рений. Было установлено, что из всех легирующих элементов рений наиболее эффективно повышает длительную прочность никелевых сплавов (рисунок 28).

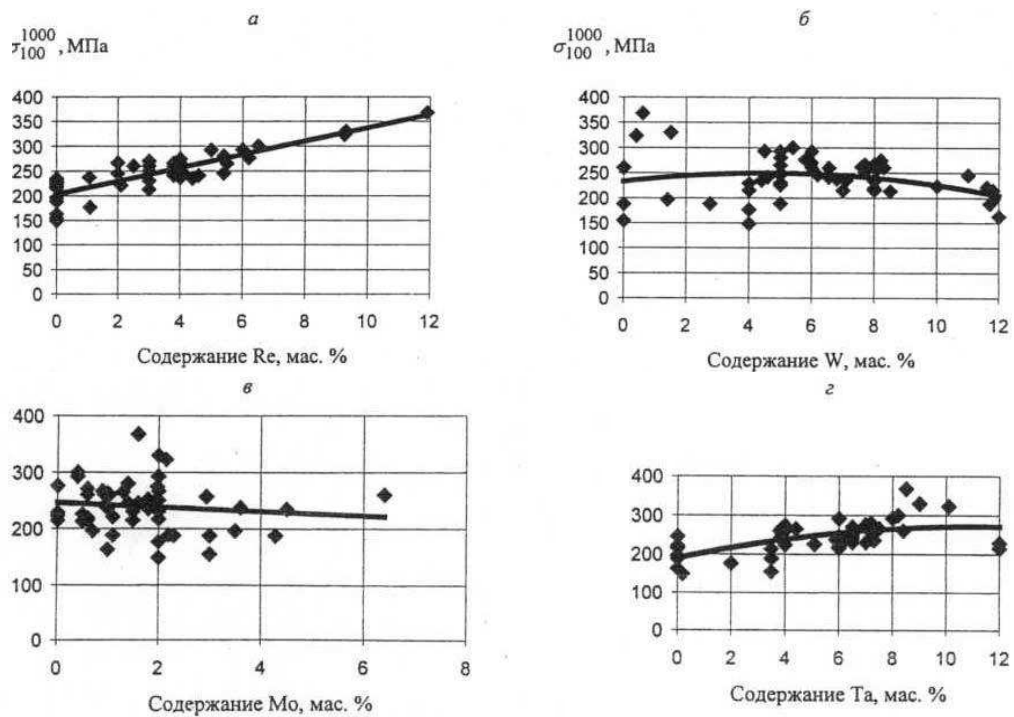


Рисунок 28 – Влияние легирования на длительную прочность при температуре 1000°С и базе 100 ч монокристаллов с ориентацией <001> из жаропрочных никелевых сплавов

Развитие этого направления во ФГУП «ВИАМ» привело к получению жаропрочных сплавов, в которых концентрация рения увеличена до 9–12%. Совершенствование легирования осуществляли путем одновременного улучшения физико-химических (температуры  $\gamma'$ -солвус и солидус) и структурно-фазовых (периоды кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз и их размерное несоответствие, объемная доля  $\gamma'$ -фазы) характеристик сплавов за счет добавок все большего количества рения, как основного твердорастворного упрочнителя  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз, и сбалансированного увеличения суммарного содержания тугоплавких (Re, Mo, Ta, W) и  $\gamma'$ -образующих (Al, Ta) металлов, снижения концентраций Cr, Ti, Hf, а также исключения из систем легирования Nb и V. В результате были получены монокристаллические ренийсодержащие ЖНС с высоким уровнем оптимизируемых параметров. При этом была в основном решена проблема их фазовой нестабильности, проявляющаяся в образовании при длительном воздействии высоких (>1000°С) температур значительного количества ТПУ фаз различного типа [12]. Каждый по-своему влияет на физические и химические характеристики сплава, поэтому, как правило, они вводятся в базовый состав комплексно, в различных комбинациях и пропорциях (рисунок 29).



ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА СТАЛИ (ДЛЯ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ И НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ)						
ЭЛЕМЕНТ (ОБОЗНАЧЕНИЕ В МАРКИ СТАЛИ)	ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ	ОТНОСИТЕЛЬНОЕ УДЛИНЕНИЕ	ТВЕРДОСТЬ	СВАРИВАЕМОСТЬ	СТОЙКОСТЬ К КОРРОЗИИ	ЖАРОПРОЧНОСТЬ
НИКЕЛЬ (Н)	ПОВЫШАЕТ	НЕ ОКАЗЫВАЕТ ЗАМЕТНОГО ВЛИЯНИЯ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ
ВОЛЬФРАМ (В)	ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ
МОЛИБДЕН (М)	ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ
ВАНАДИЙ (Ф)	ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ
НИОБИЙ (Б)	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	НЕ ОКАЗЫВАЕТ ЗАМЕТНОГО ВЛИЯНИЯ	ПОВЫШАЕТ
ТИТАН (Т)	ПОВЫШАЕТ	НЕ ОКАЗЫВАЕТ ЗАМЕТНОГО ВЛИЯНИЯ	ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ	НЕ ОКАЗЫВАЕТ ЗАМЕТНОГО ВЛИЯНИЯ	ПОВЫШАЕТ
ХРОМ (Х)	ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ	ПОНИЖАЕТ	ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШАЕТ	ПОВЫШАЕТ

Рисунок 29 – Сводная таблица легирующих элементов

Для стабилизации фазового состава и снижения вероятности выделения ТПУ фаз было предложено высокорениевые ЖНС легировать рутением, обладающим рядом несомненных преимуществ по сравнению с рением. Он имеет почти в два раза меньшую плотность, менее склонен к образованию ТПУ фаз и практически не ликвидирует в процессе кристаллизации. Недостатком рутения является его довольно высокая стоимость.

Реализовать преимущества высокорениевых монокристаллических ЖНС позволили прогрессивные методы металлургии выплавки сплавов, обеспечившие снижение содержания примесей газов O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (менее 0,001%) и S (менее 0,0005%), а также высоко градиентные технологии монокристаллического литья лопаток и специальные режимы их термической обработки.

Выбор химических элементов для легирования сплава с целью повышения его жаропрочности определяется свойствами, которые ему необходимо придать. Среди часто применяемых для легирования элементов можно назвать никель (Ni), вольфрам (W), молибден (Mo), ванадий (V), кобальт (Co), ниобий (Nb), титан (Ti).

Например, молибден, титан и ниобий являются карбидообразователями. Связывая содержащийся в сплаве углерод в прочные карбиды, они обеспечивают эффективное торможение дислокаций и диффузий, усиливают

межатомные связи, способствуют формированию более стабильной структуры материала и повышению его жаропрочности. Наличие в сплаве никеля обуславливает его сопротивление к окислению на воздухе, а в комбинации с кобальтом, никель способствует повышению длительной прочности сплава [13].

## 5 Современное плавильное оборудование, применяемое для выплавки жаропрочных сплавов

### 5.1 Индукционные плавильные печи

#### 1) Inductotherm

Компания Inductotherm Corp. является крупнейшим в мире изготовителем индукционного плавильного и нагревательного оборудования.[14]. Печь прочной конструкции для плавки металла посредством низкочастотной и высокочастотной индукции рисунок 30.

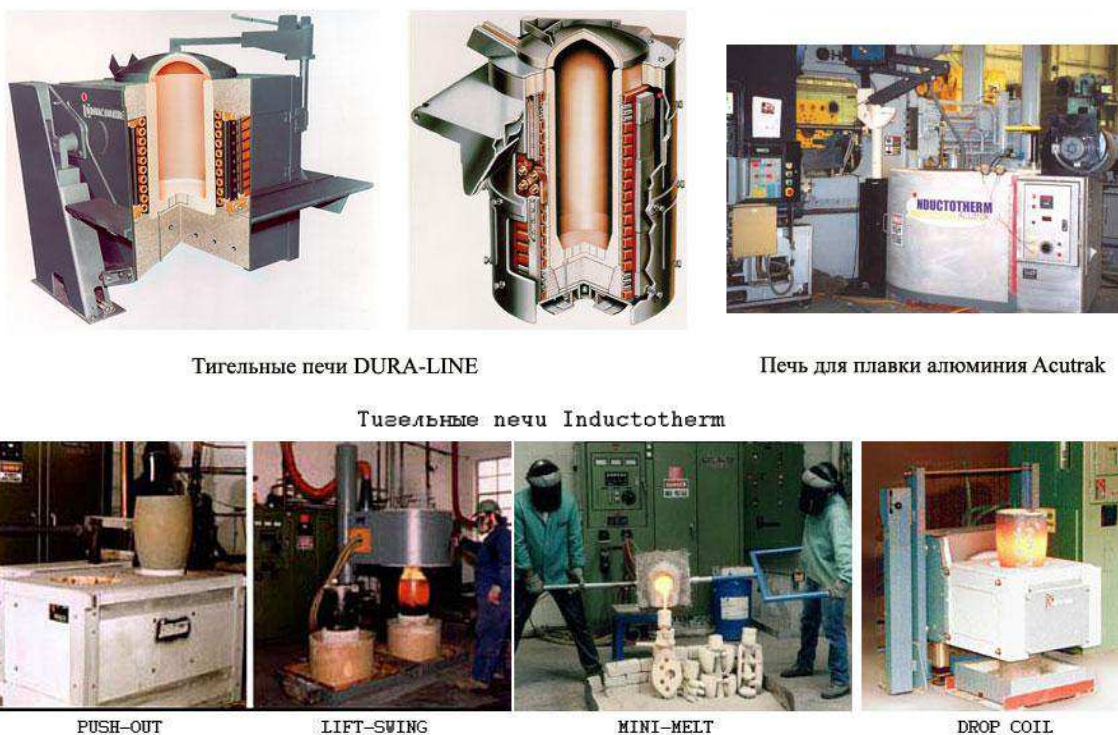


Рисунок 30 – Печь прочной конструкции для плавки металла посредством низкочастотной и высокочастотной индукции

- конструкция, отличающаяся высокой степенью прочности
- отсутствие асбестовых материалов
- вместимость до 3 000 Кг
- поднятие с помощью гидравлического устройства или подъемного крана
- установка по желанию заказчика оброчей, предназначенных для улавливания пыли и дыма

- установка по желанию заказчика крышки печи [14].

#### Индукционные печи без сердечника со стальным корпусом

- высокая мощность
- непревзойденная прочность
- совершенная стойкость и выносливость

#### Преимущества печей со стальным корпусом (рисунок 30):

- прочная проектировка обеспечивает более продолжительный срок службы внутренней поверхности печи
- бесшумность в работе обуславливает более благоприятные условия труда
- широкие боковые окна для легкости доступа при техническом обслуживании
- катушка полностью закрыта и защищена от попадания раскаленных частиц расплавленного жидкого металла
- теплопотери сведены к минимуму благодаря крышкам с рефракторным покрытием
- достаточный пространственный промежуток над уровнем катушки для обеспечения легкой загрузки печи
- при желании более высокая степень экологичности процесса выплавки металла благодаря наличию кольца, предназначенного для захвата и задержки пыли и дыма
- наличие катушки широкого разреза с целью получения более высокой производительности плавки
- наличие магнитных шунтов, предохраняющих устройство от чрезмерного нагревания
- благодаря наличию большего промежутка между витками обмотки катушки обеспечивается более высокая электрическая производительность и меньший уровень влажности
- отсутствует необходимость в пружинах благодаря наличию вертикальных штырей
- основание открытого типа уменьшает степень влажности
- более продолжительный срок службы внутренней поверхности за счет использования в нижней и верхней частях устройства витков охлаждения из нержавеющей стали

- поддержка внутренней поверхности печи благодаря наличию готовых литейных рефракторных блоков, установленных в нижней и верхней частях устройства в соответствии с формой печи
  - детектор для обнаружения утечек жидкого металла, установленный в целях большей надежности работы устройства
  - возможность по желанию за короткий промежуток разобрать внутреннюю стенку печи при помощи устройства перемещения внутренних печных стенок
  - возможность установки на ножки устройства груза для более тонкой работы
- наличие цилиндров обратного вращения, предназначенных для облегчения снятия металлической окалины [14]. Индукционная печь представлена на (Рисунке 31).

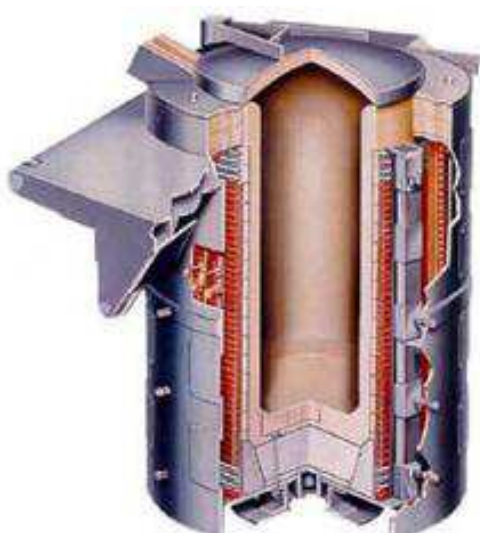


Рисунок 31 – Индукционная печь

## 2) Тигельные индукционные печи OTTOJUNKERGroup

Обширный диапазон индукционных печей (таблица 7) для плавки разливки и выдержки различных металлов, включающий:

- Канальные индукционные печи

- Разливочные
- Среднечастотные индукционные плавильные печи [15].

Таблица 7– Технические характеристики для плавки тяжелых металлов

Тип печи	Емкость тигля(кг)	Мощность плавления до (кВт)	Производительность плавления до (кг/ч)(медь)	Производительность плавления до (кг/ч) (бронза Ms 60)
МФТ Cu	600	400	1000	1400
	900	500	1250	1750
	1200	600	1500	2100
	1800	900	2200	3200
	2400	1200	2900	4400
	3600	1400	3600	5200
	4800	1600	4100	5900
	6000	1800	4600	6700
	7200	2000	5100	7400
	9600	2500	6400	9300
	12000	3000	7700	11100
	14400	3500	9000	13000
	16000	4000	10300	14800
	20000	5000	12800	18500
30000	6000	15400	22200	

3) Установки индукционные плавильные вместимостью от 1 до 16 тонн РЭЛТЕК

На рисунке 32 представлена индукционная печь РЭЛТЕК. А в таблице 8 и 9 представлены технические характеристики и параметры индукционных печей соответственно.

Преимущества:

- Активное перемешивание металла и высокая гомогенность расплава;
- Возможность зонного перемешивания (фокусирования энергии) в печи;
- Отсутствие угара легирующих элементов;
- Возможность плавки без "болота";
- Широкие технологические возможности при большом выборе емкости печи, типе футеровки и рабочей частоте печи;
- Точная регулировка температуры расплава;
- Возможность плавки и выдержки металла в одном печном агрегате;
- Мгновенная готовность к работе;
- Высокая скорость плавки;

- Малые удельные показатели потребления электроэнергии на тонну выплавленного металла;
- Экологичность технологического процесса;
- Сохранение качества питающей сети;
- Плавка цветных металлов в набивном тигле [15].



Рисунок 32 – Установка индукционная плавильная РЭЛТЕК

Таблица 8 – Технические характеристики

Тип установки	Мощность, кВт	Частота тока, Гц	Номинальная емкость, т	Скорость плавки чугуна/стали, т/ч	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	Расход эл/эн, кВт/ч
УИП-800-1,0-1,0x2Г	800	1000	1,0	1,40/1,20	13,0	530-620
УИП-1000-0,5-2,0x2Г	1000	500	2,0	1,80/1,60	26,0	530-610
УИП-1600-0,25-3,0x2Г	1600	250	3,0	2,90/2,45	33,0	520-610
УИП-3600-0,25-6,0x2Г	3600	250	6,0	7,10/6,00	82,0	510-610
УИП-5400-0,25-10,0x2Г	5400	250	10,0	10,00/8,50	150,0	510-600
УИП-10000-0,15-16,0x2Г	10000	150	16,0	18,00/16,00	220,0	500-600

Таблица 9 – Параметры модельного ряда двухпостовых тандемных установок

Параметры и производительность установки при однопостовой плавке чугуна	Вместительность печи, т							
	1	2	3	4	6	8	10	16
Почасовой темп плавки чугуна при технологических перерывах 20%, т/ч	1,15	1,72	2,62	3,80	5,33	8,15	8,31	16
Мощность источника питания, кВт	800	1200	1800	2600	3600	5400	5400	10000
Суточная производительность печи при 8-и часовой работе, т/сутки	9,2	13,8	21	30	42,6	65,2	66,5	128
Мощность источника питания, кВт	800	1200	1800	2600	3600	5400	5400	10000
Мощность источника питания, кВт	800	1200	1800	2600	3600	5400	5400	10000
Расход электроэнергии на плавку 1 тонны чугуна, кВтч/т	560	560	550	550	540	530	520	500
Напряжение и частота на индукторе печи, кВ/кГц	1,0/1,0	1,5/0,5	1,8/0,25	1,8/0,25	1,8/0,25	3,0/0,25	3,0/0,25	3,0/0,15

#### 4) Плавильные печи компании ABP InductionSystemsGmbH

Для плавки черных металлов ABP Induction предлагает приведенные ниже серии среднечастотных индукционных тигельных печей (рисунок 33) 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

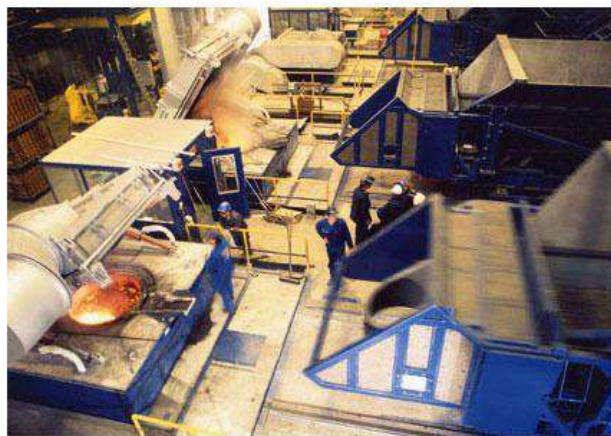
- серия IFM – высокопроизводительные индукционные тигельные печи емкостью от 6т до 37т мощностью до 16000 кВт

- крупнотоннажные индукционные тигельные печи емкостью 20 – 60 т мощностью до 17000 кВт [15].





Печи серии Smart FS и FS



Печи серии IFM



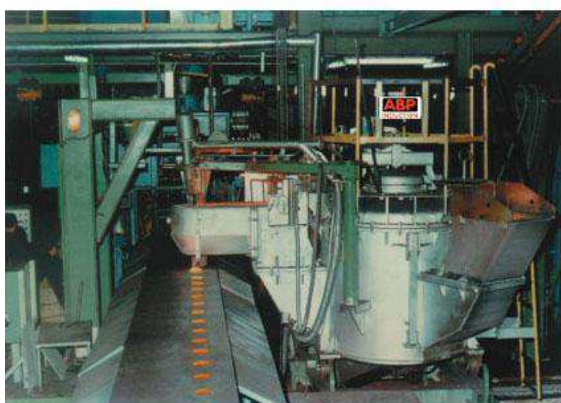
Крупнотоннажные индукционные тигельные печи



Рисунок 33 – Серии индукционных печей ABP Induction

Автоматизация процесса заливки форм - обязательное условие производства высококачественного литья.

Установки PRESSPOUR® серии OCC с индукционным подогревом расплава и POUROMAT серии OCU без подогрева расплава (рисунок 34) [15].



Установка PRESSPOUR® серии OCC



Установка POUROMAT серии OCU

Рисунок 34 – Установки серии OCC и OCU

В установках обеих серий используется так называемая «чайниковая» конструкция с 2-мя сифонами: один - для заполнения установки расплавом, второй – с разливочным носком со стопорным механизмом для заливки форм.

Все полученные данные сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Основные характеристики лидирующих мировых компаний по изготовлению индукционных плавильных печей

Наименование индукционных печей	Страна; произв.	Объем; тонн	Мощность; кВт	Частота; кГц	Напряжение; В	Скорость плавки; тонн/час
МетаКуб	Россия	0,1-20	100-12000	1-0,2	380-1150	0,31-22
Торговый дом курай (ИСТ, ИЧТ, ИАТ, ИЛТ)	Россия	0,06-10	100-1500	2,4-1	380	0,1-18
Петра	Россия	0,06-1	100-800	2,4-1	380-570	0,1-1,3
Паралель (ИПТ)	Россия	0,005-1	16-630	22-1.		0,3-1,5
ТерМИКС (ИСТ, ИЧТ)	Россия	2,9-48		2,4-0,5		0,23-2,8
Пецилтех	Россия	0,06-6				
Содружество	Россия	0,75-1	80-500			
Термолит (ИТПЭ)	Россия	0,03-2,5	50-1600		380-1000	0,06-1,85
Термолит (ИТПЭ)	Россия	0,03-2,5	50-1600		380-1000	0,06-1,85
ABB	Германия	0,25-60	280-17000			36
IMR Group	Италия		85-160			
OttoJunker	Германия	0,5-25	500-2000			0,9-38,1
FOMET	Италия	6,5-50				
AiT	Китай	0,1-20	750-1200	0,5-0,2	380-1150	1,15-22
EGES	Турция	0,15-25	800-			15-80
InductothermCorp	США	1,2-500				

Для выплавки сплава 40X24H12CЛ диска ступени турбины, была выбрана плавильная печь компании Inductotherm так как плавильные печи производства США значительно превышают все характеристики предложенных печей, и с хорошим качеством самого оборудования как в эксплуатации, так и в обслуживании. Контрено была выбрана печь с объемом тигля 500 кг.

## 5.2 Подготовка используемых отходов при плавке

Литейные отходы представляют собой кусковую шихту (литники, прибыли, центральные стояки и т.д.). Доля отходов в балансе металла при

производстве отливок может достигать 80 %, что значительно сокращает стоимость литья.

Наибольшую долю (около 75 – 80%) в общем балансе литейных отходов цеха составляют центральные стояки, литники и прибыли. Брак отливок составляет 3 – 5%. К литейным отходам также относятся настыль в металлоприёмниках и заливочных лотках, а также гарнисаж вышедших из строя тиглей (их суммарное количество составляет 13 – 15%). Стружка после первичной механической обработки отливок составляет около 2%.

Все литейные отходы жаропрочных сплавов по степени загрязнённости классифицируют на сортовые и несортовые.

Сортовые отходы подразделяют на отходы первого и второго сорта. К отходам первого сорта относятся элементы литниковых систем и прибылей, настыль в металлоприёмниках и заливочных лотках, бракованные по геометрии и рентгеноконтролю (но не по химическому составу) отливки.

Ко второму сорту относятся отливки, забракованные по химическому составу, и отходы, образовавшиеся при их производстве.

Несортовыми отходами считают скрап в печи, использованные гарнисажи, стружку от черновой механической обработки отливок, а также мелкокусковые отходы, перепутанные по маркам сплавов.

Регенерация несортовых отходов очень трудоёмка и длительна, поэтому при производстве фасонных отливок экономически выгодно использовать только сортовые отходы [16].

У сортовых отходов загрязнён посторонними примесями (азот, углерод, кислород, водород) в основном тонкий поверхностный слой глубиной приблизительно 0,5 – 0,8 мм. При резке и измельчении отходов происходит дополнительное загрязнение металла в местах реза. Например, в зоне ацетиленокислородного реза образуются различного вида соединения титана с кислородом, азотом, углеродом и водородом. Толщина газонасыщенного слоя при оптимальном режиме резки составляет около 0,1 – 0,15 мм.

При анодно-механической резке поверхность металла насыщается продуктами взаимодействия расплавленного металла с атмосферными газами на глубину до 0,2 мм и более.

С целью удаления остатков материала литейной формы с поверхности сортовых отходов, а также удаления поверхностного загрязнённого слоя применяют механическую и химическую очистку.

Перед очисткой отходы измельчают до размеров, обеспечивающих их компактную укладку при переплаве.

Механическую очистку производят в галтовочных и дробемётных барабанах, в дробемётных и дробеструйных камерах. Дробеструйная или

дробемётная обработка очищает литую поверхность отходов более эффективно, чем галтовка. Продолжительность очистки отходов на глубину около 0,1 мм в галтовочных барабанах составляет от 8 до 10 ч.

Продолжительность такой же очистки в дробемётных барабанах и в дробеструйных камерах составляет 1 – 1,5 ч. Галтовкой, дробемётной и дробеструйной обработкой практически не очищаются закрытые и труднодоступные поверхности. Поэтому такие участки отходов удаляются резкой или зачищаются на наждачных кругах.

После механической очистки производят обработку окисленных поверхностных слоёв отходов растворами NaOH (600 – 650 г/л); NaNO<sub>3</sub> (200 – 250 г/л) и NaNO<sub>2</sub> (50 – 60 г/л) или NaOH (500 – 700 г/л) и NaNO<sub>2</sub> (150 – 250 г/л). Температура раствора ≈ 140 °С, время обработки от 30 мин до 2 ч.

Затем отходы промывают в тёплой и холодной воде и травят в кислотном растворе следующего состава: S<sub>4</sub>OH<sub>2</sub> (60 – 70 мл/л; плотность 1,84 г/см<sup>3</sup>) и HF (60 – 140 мл/л; плотность 1,13 г/см<sup>3</sup>). Температура раствора ≈ 20 °С. Скорость травления составляет 0,2 – 0,5 мм/ч. Очищенные отходы промывают в холодной воде и сушат при 110 – 150 °С.

Химическим травлением с поверхности жаропрочных отходов удаляется налёт железа и абразива. Отходы после травления приобретают характерный серебристый цвет. Отходы в шихту могут вводиться либо загрузкой непосредственно в тигель перед плавкой, либо в виде заранее изготовленного электрода. Расходуемые электроды из одних отходов изготавливают сваркой в среде инертного газа, укладывая куски таким образом, чтобы полученный электрод имел в поперечном сечении более или менее правильную геометрическую форму. Сварные швы выполняют достаточно большого сечения во избежание разрушения электрода в процессе плавки [16].

## 6 Изготовление форм и стержней

### 6.1 Современные методы изготовления форм и стержней

#### Вакуум-пленочная формовка

Вакуумно-пленочная формовка (V-процесс) – технология изготовления форм для литья с помощью термопластичной пленки (рисунок 35). Название распространилось также на процесс получения отливок в формы, созданные по данной технологии. В основе данного метода формования лежит создание вакуума, который увлекает термопластичную пленку вниз на контур подготовленной модели и сохраняет стабильность формы при заливке и охлаждении вплоть до процесса отделения отливки [24].

Литье в вакуум-пленочную форму имеет ряд преимуществ перед литьем в песчано-глинистые формы, поскольку позволяет изготовить отливки сложной формы, в том числе тонкостенные и с разной толщиной стенок с улучшенными свойствами:

- более плотной структуры;
- меньшими механическими напряжениями за счет особых условий кристаллизации и охлаждения отливки;
- минимальным количеством посторонних включений;
- чистой поверхностью;
- высокой точностью размеров;
- с возможным отсутствием литейных уклонов и радиусов [24].



Рисунок 35 –Вакуумно-пленочная формовка  
СЕЙАТЦУ - процесс

Эта технология уплотнения разовых песчано-глинистых форм и уже стала стандартом при получении различной номенклатуры отливок по ПГС-процессу (рисунок 36), например, для мирового автопрома [25].



Рисунок 36 –Образец полуформы по Сейатцу-процессу

Уплотнение формовочной смеси происходит способом Сейатцу – воздушным потоком с последующим прессованием. Пространство у модельной оснастки, состоящее из подмодельной плиты/держателя подмодельной плиты, опоки и наполнительной рамы, заполняется необходимым количеством формовочной смеси открыванием жалюзийных затворов бункера-дозатора - шаг 1 (рисунок 37). Затем бункер-дозатор передвигается под ленточный питатель бункера смеси, а прессовая головка занимает положение над пространством формы [25].



Рисунок 37 –Последовательность процесса уплотнения форм по Сейатцу-процессу

Стол машины поднимается и давит держатель подмодельной плиты с опокой и наполнительной рамой к прессовой головке таким образом, что все пространство формы оказывается герметично закрытым. Затем кратковременно открывается клапан воздушного потока. Воздушный поток проходит формовочную смесь от контрладаполуформы в сторону модели и уходит через венты в держателе подмодельных плит и/или в самой подмодельной плите - шаг 2 (рисунок 37). Дополнительное прессование сверху плоской прессовой плитой, мембраной или многоплунжерной головкой производит окончательное уплотнение формы - шаг 3 (рисунок 37). Во время процесса уплотнения бункер-дозатор снова заполняется смесью. Протяжка модели из формы происходит путем опускания стола машины. Одновременно в исходное положение передвигаются бункер-дозатор смеси и прессовая головка - шаг 4 (рисунок 37).

### Преимущества СЕЙАТЦУ-процесса

Равномерная твердость формы является предпосылкой для изготовления отливок высокой размерной точности. Сравнение между встряхиванием с подпрессовкой и Сейатцу-процессом наглядно показывает более равномерную твердость формы, изготовленной способом Сейатцу (рисунок 38) [25].

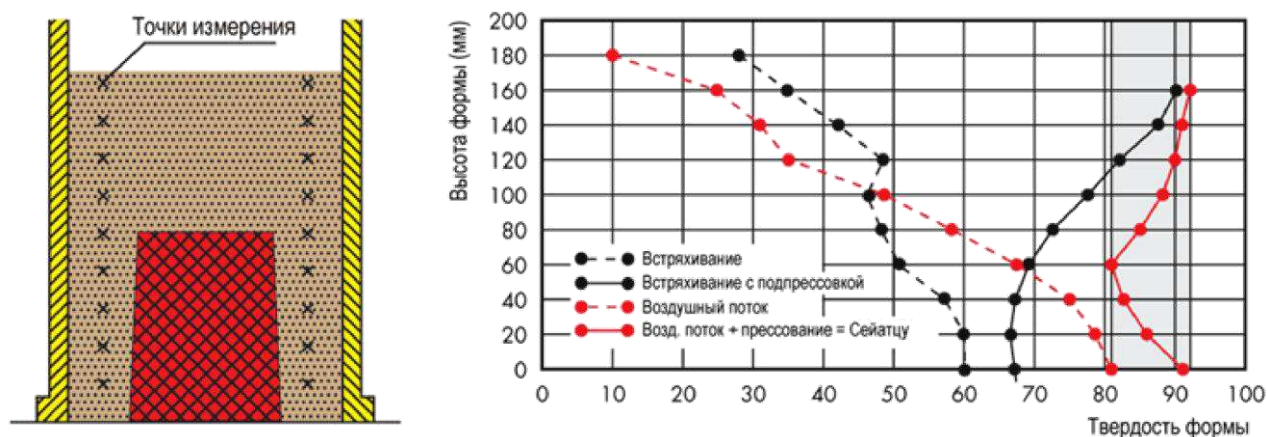


Рисунок 38 – Результаты испытаний твердости формы по инновационному способу уплотнения песчано-глинистых форм - Сейатцу-процесс и старым традиционным технологиям

### Резол - CO2

Связующая система Резол (рисунок 39) предназначена для получения холоднотвердеющих смесей, применяемых при литье черных и цветных

металлов. Однокомпонентный состав действует по технологии газового отверждения (углекислым газом).

Связующим веществом является щелочная фенолоформальдегидная смола. В составе вещества отсутствует азот, сера и фосфор. Для образования полимера смола перемешивается с песком. Затем в стержневой ящик поступает углекислый газ. В процессе формирования полимера вяжущее вещество взаимодействует с CO<sub>2</sub>. Изготовленные с помощью Резола стержни используются для всех типов отливок. Благодаря текучести и повышенной начальной прочности смеси можно изготавливать стержни сложной конфигурации.



Рисунок 39 – Форма выполненная из связующей системы резол CO<sub>2</sub>

Высокое качество готового изделия подтверждается следующими показателями:

- отсутствие смоляных наростов;
- устраняется появление горячих трещин;
- высокие временные показатели схватывания смеси и ее прочности;
- возможность использования смеси в течение 3 суток.

Кроме того, при эксплуатации и переработке Резол CO<sub>2</sub> не выделяет вредных веществ, практически отсутствует запах. Поэтому не требуется проветривания помещения после работы [17].

В таблице 11 указаны основные связующие системы и описание.



Таблица 11 – Описание связующих систем

Наименование	Описание
NOVANOL 165	Связующая система, относящаяся к системам, работающих по технологии газового отверждения (с помощью CO <sub>2</sub> ).
Ставроформ CO <sub>2</sub>	Связующая система, предназначена для изготовления холоднотвердеющих смесей, отверждаемых углекислым газом (Rezol-CO <sub>2</sub> процесс).

### ColdBoxAmin

Трехкомпонентная система Coldbox (рисунок 40) применяется в литейном производстве при литье алюминия и легких сплавов. Состоит из трех компонентов: связующего (на основе фенолоформальдегидной смолы), газообразного катализатора и активатора.

Связующее вещество (смола) перемешивается с наполнителем (песок), после чего, образовавшийся состав задувается воздухом в стержневую или формовочную оснастку. Для отверждения смесь продувается катализатором (третичный амин) смешанным с сухим воздухом или углекислым газом. Приготовление и подачу газообразной смеси катализатора с активатором осуществляют специальные газогенераторы. Благодаря этой процедуре достигается равномерное и быстрое отверждение формы или стержня. Coldbox процесс может использоваться для приготовления стержней сложной формы.



Рисунок 40 – Форма выполненная из связующей системы COLD BOX AMIN

### Преимущества Coldbox

Использование COLD BOX AMIN процесса имеет следующие преимущества:

- высокая производительность, достигаемая благодаря повышенной скорости схватывания и моментальной прочности смеси;
- точность изготовления форм и стержней, а также быстрое удаление оснастки;
- минимальное выделение вредных газообразных веществ.

В экономическом плане, система Coldbox имеет невысокие расходы на энергетические и трудовые ресурсы [17]. В таблице 12 указаны основные связующие системы и описание.

Таблица 12 – Описание связующих систем

Наименование	Описание
ASKOCURE 366	Смоляной компонент для системы ColdBox-amin обеспечивающий, совместно с системой ASKOCURE 666, продолжительное время хранения стержней, и хорошую начальную и конечную прочность.
ASKOCURE 388	Смоляной компонент для системы ColdBox-amin обеспечивающий, совместно с системой ASKOCURE 666 или ASKOCURE 688, продолжительное время хранения стержней, и хорошую начальную и конечную прочность.
ASKOCURE 666	Полиизоцианатный компонент для системы ColdBox. Оптимальные свойства достигаются в комбинации с ASKOCURE 366.
ASKOCURE 688	Полиизоцианатный компонент для системы ColdBox. Оптимальные свойства достигаются в комбинации с ASKOCURE 388 и 366.
ECOCURE 300 WM 10	Смоляной компонент для процесса «ColdBox-amin», который, совместно с компонентом «ECOCURE 600 WM 11» или «WM 20», позволяет снизить выделение блестящего углерода.
ECOCURE 600 WM 11	Полиизоцианатный компонент для процесса «Cold-Box-amin». Оптимальные свойства получены в комбинации со смолой Ecocure 300 WM 10.
KATALYSATOR 702	Диметилэтиламин
KATALYSATOR 704	Диметилизопропиламин
Ставроформ АМ	Связующая система предназначена для

## FURAN

Формовочные смеси на основе фурановых смол (рисунок 41) в качестве связующего компонента востребованы при литье тяжелых чугуновых отливок, когда необходима повышенная прочность оснастки. Смолы представляют собой конденсированные полимерные вещества, получаемые из формальдегида, спирта (или ацетона) и мочевины.

В нормальных условиях отверждение фурановых смол происходит довольно медленно. Для повышения скорости отверждения нужно либо нагреть фуран до температуры 150 градусов, либо применить катализатор (на основе минеральных или сульфатных кислот). В процессе формообразования получается гладкая и прочная поверхность пресс-формы или стержня. При использовании противопригарного покрытия отливка легко удаляется из формы [17].

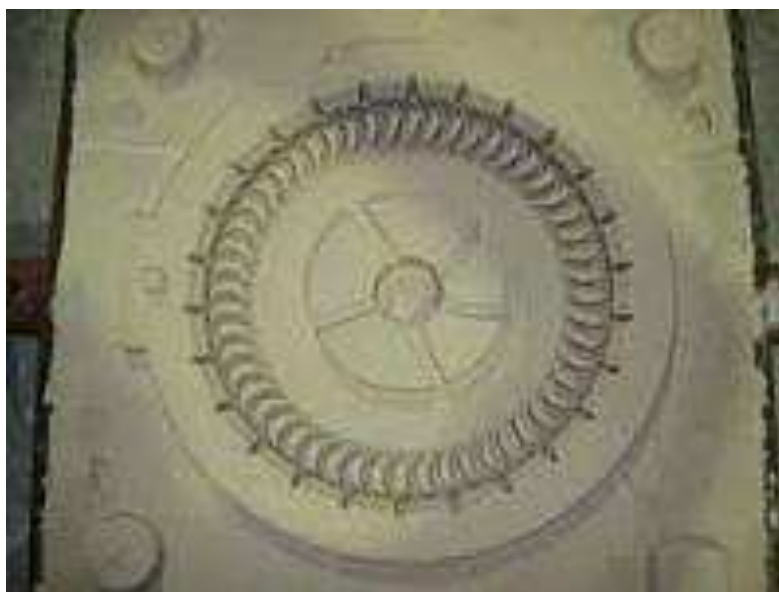


Рисунок 41 – Форма выполненная из связующей системы FURAN

### Достоинства связующей системы Furan

Отличительными чертами связующих систем на основе Furan являются следующие параметры:

- высокая реакционная способность, позволяющая при соответствующих условиях (качественный отвердитель, температурный режим) набрать максимальную прочность в кратчайшие сроки;

- возможность получения идеально гладкой поверхности отливок (благодаря отсутствию в составе азота);

- экологическая и санитарно-гигиеническая безопасность обеспечивается минимальными выбросами вредных веществ в процессе формовки.

Таким образом, связующая система на основе фурана может с успехом применяться в любом типе литейного производства [17].

В таблице 13 указаны основные связующие системы и описание.

Таблица 13 – Описание связующих систем

Наименование	Описание
ASKURAN 381	Фурановая смола с низким содержанием азота.
ASKURAN NB 7915 D	Полиуретан процесс No-Bake.
HARTER GS II	Отвердитель NoBake для фурановых и фенольных смол.
HARTER RAPID 05	Быстродействующий отвердитель NoBake для фурановых и фенольных смол.

### Pereset

Современная связующая система Pereset (рисунок 42) применяется для приготовления литейной оснастки при литье, как цветных, так и черных металлов и сплавов. Связующими веществами выступают смолы на полиуретановой основе.

Система имеет высокую скорость отверждения (менее 2 минут). Применение жидкого амина позволяет использовать состав смеси для приготовления оснастки во многих типах литейного производства. При этом прочность отдельных модификаций связующих позволяет производить отливки из тяжелых металлов. Связующие компоненты могут работать как со свежими песками, так и с регенерированным составом.

#### Преимущества использования PEPSSET

Достоинствами Пепсет процесса являются следующие факторы:

- высокая производительность, достигаемая благодаря быстрому отверждению смеси;

- возможность регенерации состава;

- высокие прочностные характеристики пресс-формы и стержней;

- возможность регулировать скорость отверждения смеси.

Кроме этого, к преимуществам данного процесса следует отнести универсальность и простоту использования системы [17]. В таблице 14 указаны основные связующие системы и описание

Таблица 14 – Описание связующих систем

Наименование	Описание
PEP SET™	Производительная и гибкая система ХТС связующих.



Рисунок 42– PEPSET

#### Горячие стержневые ящики - hotbox процесс, warmbox

Процесс HOT-BOX (рисунок 43) представляет собой процедуру изготовления стержней путем отверждения их в нагреваемой свыше 200 0С оснастке. Связующим служит синтетическая смола, получаемая методом конденсации карбамида с формальдегидом.

Применяется HotBox процесс при литье тяжелых отливок из чугуна и стали. В стержневые ящики готовую смесь вводят пескочувным способом. В основе процесса отверждения лежит процедура полимеризации смол. По мере нагревания оснастки стержень упрочняется. Для ускорения отверждения в состав смеси добавляют кислые соли латентного действия. После того, как стержни покинули горячие стержневые ящики, они приобрели необратимую структуру и не подлежат регенерации.

#### Преимущества применения HOT-BOX

Метод получения стержней путем нагревания в стержневых ящиках идентичен WarmBox процессу и имеет такие же достоинства:

- высокая точность и прочность изготавливаемых стержней;
- короткий срок приготовления изделий;
- высокая производительность литейного производства.

Вместе с тем, данный процесс не является экологически безопасным, поскольку в ходе изготовления оснастки выделяются вредоносные газы [17].

В таблице 15 указаны основные связующие системы и описание.

Таблица 15- Описание связующей системы

Наименование	Описание
Ставроформ-90Л	Связующая система представляет собой карбамидофурановую смолу и является продуктом конденсации карбамида с формальдегидом, модифицированную фурфуроловым спиртом.



Рисунок 43 –Форма, выполненная из связующей системы Nothox

## **6.2 Щелочные полифеноляты, отверждаемые жидкими и газообразными сложными эфирами (ALPHA-SET- и BETA-SET-процессы)**

Эта связующая система, лежащая в основе так называемого ALPHA-SET-процесса, была разработана английской фирмой Borden; первые посвященные ей публикации появились в конце 1979 года.

Преимущества связующей системы по ALPHA-SET-процессу:

- быстрое объемное отверждение, что позволяет заливать формы металлом через 2—3 ч после приготовления смеси;
- малые объемы выделений паров свободного фенола, формальдегида и метанола (по сравнению с кислотоотверждаемыми фенол -

формальдегидными и фурановыми смолами) на стержневых и формовочных участках;

- практическое отсутствие выделений диоксида серы и сероорганических соединений на участках заливки, остывания и выбивки форм, характерных для ХТС с фурановыми смолами, отверждаемыми ароматическими сульфокислотами;

- меньшая чувствительность к влаге по сравнению с ХТС на фурановых смолах и особенно ХТС на фенолоизоцианатных связующих;

- пониженная склонность к науглероживанию поверхности стальных отливок, исключение насыщения поверхности отливок серой, отсутствие азота и связанной с ним газовой пористости в отливках;

- сочетание высокой термостойкости и определенной податливости форм и стержней при высокотемпературном прогреве, что снижает (хотя и не исключает полностью) вероятность возникновения дефектов отливок типа просечек и горячих трещин;

- универсальность в отношении сплавов для отливки - возможно производство как чугунных, так и стальных отливок.

Недостатки:

- несколько меньшая прочность, особенно прочность кромок стержней и форм, по сравнению с ХТС на фурановых смолах средней и высшей категорийности (с содержанием фурфуролового спирта в смоле 60% и более) и ХТС на феноло-изоцианатном связующем при большем расходе связующего (1,5-2,5 мас. ч. на 100 мас. ч. песка, тогда как в упомянутых ХТС суммарный расход связующего составляет 1,2-1,6 мас.ч.); [19].

- более сложный процесс регенерации отработанных смесей, требующий, помимо традиционных методов механической обработки возврата его химической нейтрализации для избавления от повышенной щелочности с последующей термообработкой при температуре 700°C.

За рубежом процесс ALPHA-SET используется рядом производителей отливок, хотя нельзя говорить о его глобальном распространении, что объясняется наличием других конкурентоспособных технологий. Примерами импортных материалов являются связующее CHEM-REZ 600 и серия отвердителей CHEM-REZ 6000 (Ashland, США).

В России производство материалов для ALPHA-SET-процесса осуществлено предприятием ООО "ЭКТИС-2" (г. Дзержинск) совместно с ОАО «НИИЛИТМАШ»: изготавливаются связующее Термэко-01 (ТУ 2477-007-00224656-01) и отвердители К-ЗБ, К-ЗС, К-ЗМ (ТУ 2332-008-00224656-01).

Экологические преимущества, возможность получения качественных отливок и универсальность литейных сплавов, свойственные ALPHA-SET-процессу, дают основание предполагать, что с возрождением литейной заготовительной базы в России эта технология займет достойное место как при изготовлении стержней, так и жакетных (безопочных) форм.

На сегодняшний день внедрению холоднотвердеющих смесей на российских литейных производствах препятствует то, что не решена проблема обеспечения связующими и вспомогательными синтетическими материалами отечественного производства, имеющими мировой техникий уровень. Одним из путей решения этой проблемы является образование в 2006 г. в Нижнем Тагиле совместного российско-итальянского предприятия ООО «УРАЛХИМПЛАСТ- КАВЕНАГИ». Предприятие специализируется на выпуске синтетических материалов для литейного производства. Учредителями СП стали ОАО «Уральская химическая компания» и итальянская компания CavenaghiS.p.A. Компания CavenaghiS.p.A. имеет значительный опыт по выпуску литейных связующих и вспомогательных материалов. Ей принадлежит около 60% итальянского рынка литейных смол. Компания является активным экспортером химической продукции в европейские страны, владеет новейшими рецептурами и технологиями, производит материалы для основных процессов изготовления стержней и форм: Cold-box, No-bake, Alfa-set, Beta-set, Pep-set, Hot-box, Warm-box, Termoshok, Croning, SO<sub>2</sub>, CO -процесс, а также жидкое стекло с жидкими отвердителями, антипригарные, разделительные покрытия. Компания экспортирует продукцию в страны Европы, Востока, Азии, Украину, Белоруссию. Ее потребителями являются Ferrari, FIAT/Renault, Voest-Alpine и многие другие ведущие производители отливок. Со своей стороны, Уралхимпласт более 40 лет занимается производством и поставками синтетических смол для литейного производства России, доминирует на российском рынке. Продукция объединенной компании производится на двух производственных площадках: в Лаинате (Италия) и модернизированном производстве в Нижнем Тагиле. Продукция реализуется через сеть дистрибуции Уралхимпласта со складов в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Тольятти, Ростове на-Дону.

Кроме выпускаемых традиционно карбамидно-фурановых и фенольных связующих значительное внимание уделяется развитию производства новых связующих для холоднотвердеющих смесей (ХТС).

Следует отметить, что в последние годы в промышленно развитых странах происходит масштабный переход к изготовлению стержней в холодной оснастке с отверждением путем продувки стержней в стержневых



ящиках газообразным реагентом. Наибольшее распространение получил Cold-box— amin— процесс. Этот процесс у нас применяют на нескольких заводах, он, в принципе, достаточно хорошо известен. Однако имеются определенные технологические особенности, и связующая композиция постоянно совершенствуется по ряду направлений.

В последние годы ряд предприятий за рубежом и в России освоили процесс «Альфа-сет», в котором связующим для ХТС является щелочная феноло-формальдегидная смола, а катализатором - комбинация сложных эфиров. В нашем производстве коммерческими названиями связующих этого типа являются: АЛ-КАСЕТ NB 7, АЛКАСЕТ NB или ALCAFEN.

В России эти связующие выпускаются ООО «Уралхимпласт-Кавенаги» (Нижний Тагил) и «Карбохим»(Дзержинск) [20].

ООО "Уралхимпласт-Кавенаги" предлагает следующие связующие для фенольных систем:

Область применения смол указана в таблице 16

Таблица 16 – Область применение смол

Наименование	Область применения
АЛКАСЕТ NB*	Для опочной формовки
АЛКАСЕТ NB 7*	Для безопочной формовки

Скорость отверждения химикатов определяется выбором отвердителя «КАТАЛИТ». Время отверждения смеси может быть от нескольких минут до 1 часа, таблица 17.

Таблица 17 –Характеристики смол

	Марка отвердителя				
	Каталит 1В	Каталит 2В	Каталит 3В	Каталит 6N	Каталит 11N
Живучесть смеси при 20°С, мин	5	7	12	20	30
Время извлечения из оснастки при 20°С через, мин	10	15	20	30	60

ООО "ЭКТИС-2" (г. Дзержинск) совместно с ОАО «НИИЛИТМАШ»: изготавливаются связующее Термэко-01 (ТУ 2477-007-00224656-01) и отвердители К-ЗБ, К-ЗС, К-ЗМ (ТУ 2332-008-00224656-01).

Типовой состав смеси для ALPHA-SET-процесса следующий:

- кварцевый песок -100%;

- смола - 0.8 - 2,0% в зависимости от характеристик песка, соотношения регенерат/свежий песок, типа смесителя, требуемой прочности и времени отверждения;

- отвердитель 20-25% от содержания смолы.

По опыту заводов, применение «Альфа-сет»-процесса дает существенные преимущества:

- незначительный запах при перемешивании и заполнении оснастки;
- ограниченная токсичность;
- водорастворимость связующего, возможность очистки смесителей водой;

- отсутствие в связующем азота, фосфора, серы, слабое поверхностное науглероживание;

- достаточная прочность и текучесть;

- возможность применения любых наполнителей (кварцевого песка, хромита, циркона, дистенсиллиманита);

- слабая прилипаемость к деревянной и металлической (кроме алюминия) оснастке;

- возможность эффективной механической регенерации;

- хорошие показатели по качеству отливок, в частности при изготовлении среднего и крупного стального литья.

В таблице 18 и 19 дано сравнение «Альфа-сет»-процесса с другими вариантами ХТС.

Живучесть регулируется применением различных катализаторов в пределах от 3-5 до 40-90 мин. Часто сочетают быстрый и медленный катализаторы, это зависит от температуры и характеристик песка.

Предприятие «Уралхимпласт -Кавенаги» производит несколько типов катализаторов от А-10 до А-60 и группу катализаторов «Каталит» с живучестью от 5 мин (таблица 19).

При выборе катализатора нужно знать степень щелочности песка. Для свежего песка ADV [кислотная потребность]. должно быть ниже  $0,5 \text{ см}^3 0,1 \text{ N HCl}$  на 100 г песка, ADV регенерата должно быть ниже  $5 \text{ см}^3 0,1 \text{ N HCl}$  на 100 г песка, то есть  $\text{pH}=6-8$ . Нужно следить за этим показателем, чтобы быть уверенным, что катализатор даст заданные параметры отверждения.

Регенерация включает истирание, далее охлаждение и классификация продукта. Максимальный эффект связан с нагревом песка и потерей 3-5% песка в виде пыли, без явного снижения в остатке компонентов связующего, в частности калия [19].

Таблица 18 – Основные сравнительные характеристики различных смесей.

Показатель	Альфа-сет	Фуран	Фенольная	Фенольно-изоцианатная	Жидкое стекло-эфир
Запах при перемешивании (горячий песок)].	Очень слабый	Сильный	-	-	-
Прилипание к оснастке	Отсутствует	Слабое	-	-	-
Очистка водой	Возможна	Затруднена	-	-	-
Отношение живучести к StripTime*, %	30	25	25	50	25

#### Окончание таблицы 18

Влияние горячего или холодного песка	Умеренное	Сильное	Сильное	Умеренное	Умеренное
Хранение стержней и форм	Длительное	Длительное	Длительное	Среднее	Короткое
Быстрое твердение	Возможно	Возможно	Нет	Возможно	Нет
Медленное твердение	Возможно	Возможно	Возможно	Нет	Возможно
Регенерируемость	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая

В таблице 18 указаны основные характеристики систем смесей, а в таблицах 19 и 20 совместимость и время жизни катализаторов.

StripTime - время формирования первичной прочности.

Примечание: Смеси содержали 2 мас.ч. смолы, 0,4 мас.ч. катализатора при 20-25°C.

#### Таблица 19 – Совместимость катализаторов

Показатель	Альфа-сет	Фуран	Фенольная	Фенольно-изоцианатная	Жидкое стекло - эфир
Азотистая пористость	Нет/да	Нет/ да	Нет/да	Да	Нет
Тенденция к ужиминам, пленам	Низкая	Низкая	Низкая	Умеренная	Низкая

Насыщение серой	Нет	Да/нет	Да	Нет	Нет
Тенденция к просечкам	Низкая	Высокая	Высокая	Умеренная	Низкая
Вероятность газовых дефектов	Низкая	Умеренная	Умеренная	Высокая	Низкая
Выбиваемость	Хорошая	Умеренная	Умеренная	Умеренная	Плохая
Блестящий углерод	Низкий	Умеренный	Умеренный	Высокий	Низкий

Таблица 20 – Время жизни катализаторов

Время	Катализаторы			
	A-10	A-15	A-20	A-60
	Прочность на разрыв, МПа			
1 5 мин	0,15	0,06	0,1	0
30 мин	0,4	0,12	0,1	0
1 час	0,6	0,25	0,35	0
2 часа	0,7	0,4	0,5	0,6
24 часа	1,0	0,6	1,1	0,9

Контроль регенерата включает ситовой анализ, ППП, рН и содержание калия. Об эффективности регенерации лучше судить по содержанию калия, при содержании от 0,05 до 0,15% калия прочность снижается незначительно. Важно, чтобы добавка свежего песка в регенерат обеспечивала сохранение содержания калия на требуемом уровне в пределах 0,15%. Каждый цикл при 1,4% смолы добавляет в смесь 0,1% калия. Для расчетов полезны следующие данные:

40% освежения - 0,072% калия

30% - 0,096

20% - 0,1 27

15% - 0,147

10% - 0,1 70.

Таким образом, обычное содержание регенерата 80-85% дает необходимый уровень остаточного калия. В некоторых случаях применение регенерата ограничено, поскольку максимальная прочность обеспечивается при его содержании 80-85% (при 1,4% смолы]. Увеличение прочности за счет смолы нежелательно, так как это дает рост остаточного калия, и тогда его

остаточный уровень будет выше 0,15%. Если смесь свежего песка и регенерата не дают результата, нужно увеличивать долю свежего песка [19].

### Формовка и изготовление стержней

В процессе приготовления смеси и заполнения форм смесь почти не имеет запаха, что даёт возможность ручного направления и уплотнения смеси. Свежеприготовленная смесь очень текучая и для её уплотнения не всегда требуется вибростол. Часто при формовке лёгких и среднего веса изделий производится легкое уплотнение формовочной смеси с помощью небольшой вибрации после того, как большая ее часть уже находится в форме.

Скорость отверждения смеси регулируется типом отвердителя, количество же остаётся постоянным. Хорошо, когда смеситель оснащён двумя насосами-дозаторами для отвердителей, тогда во время работы появляется возможность выбора при необходимости либо медленного, либо быстрого отвердителя. Ещё лучше если смеситель оснащён таким образом, когда возможно бесступенчатое смешивание двух типов отвердителей с помощью переключателя на панели управления смесителя. Время живучести смеси зависит от типа отвердителя, температуры песка, содержания в нём пыли, а также от количества и состава регенерированного песка в смеси.

Отделение моделей и стержневых ящиков происходит легко. Извлечение из остнастки возможно без затруднений как на начальной стадии отверждения смеси, так и на более поздней стадии отверждения. В процессе отверждения смеси не происходит выделения тепла, поэтому поверхность моделей сохраняется в хорошем состоянии в течении длительного времени, особенно при нанесении на неё хороших модельных лаков. Отвердители и связующие, используемые в AlpHaset –процессе не размягчают и не повреждают поверхность модели или лака. Но всё-таки при большом расходе связующих рекомендуется использование разделительных составов.

К моменту извлечения из остнастки связующее вещество оказывается так глубоко полимеризованным, что растворители противопопригарных покрытий не способны вновь растворить связующее. Таким образом, нанесение противопопригарных покрытий возможно сразу после извлечения модели из остнастки независимо от того, применяются покрытия на водяной или на спиртовой основе. Тепло, образующееся б при поджигании спиртового покрытия значительно укрепляет поверхность форм. AlpHaset процесс особенно хорошо подходит для нанесения покрытий методом полива. Покрытие хорошо связывается с поверхностным слоем формы, и толщина его слоя получается достаточной даже при быстром поливе.

При литье чугуна, лёгких и цветных металлов часто можно обойтись без противопригарных покрытий. При этом модельная остнастка должна быть высококачественной, а также необходимо использовать более мелкозернистый песок размером 0,20 - 0,24 мм и производить эффективное уплотнение смеси с помощью вибростола.

Время хранения стержней и форм не ограничено, затвердевающая или уже затвердевшая смесь не гигроскопична.

Если при AlpNet формовке используют более мелкозернистый песок, то и газопроницаемость отверждённой смеси будет соответственно ниже. В этом случае для удаления воздуха и газов, образующихся во время заливки верхнюю полуформу необходимо оснастить достаточным количеством отверстий для удаления газов.

Извлечение модели при использовании AlpNet – процесса происходит легче, чем при формовке на жидком стекле. При выемке полуформ больших размеров не образуется дефектов поверхности, использование регенерированной смеси считается нормальным, выбивка стержней и форм происходит легко. Проектировка участка формовки при использовании AlpNet – процесса гораздо проще по сравнению с фурановым процессом. При использовании AlpNet – процесса операцию нанесения покрытий на полуформы можно объединить с операцией извлечения из остнастки, что практически не возможно при использовании смол с кислотным отверждением [18].

#### Выбивка форм и регенерация смеси

AlpNet связующее разлагается термически полностью вокруг отливки при литье бронзы, чугуна и стали, поэтому выбивка форм и стержней происходит легко. Для выбивки форм и полуформ весом менее 2.000 кг имеются выбивные решётки, которые также служат для дробления крупных комков смеси. Участок пылеудаления и оборудование охлаждения может быть расположен рядом с выбивной решёткой насколько это позволяют площади помещения. Производительность такого участка может достигать 10 т/ч и располагается он выше уровня пола.

Для выбивки крупных форм и полуформ лучше подходит традиционная выбивная решётка, под которой отработанная смесь направляется в воронку и далее с помощью виброэлеватора в дробилку, расположенную под выбивной решёткой. Из дробилки с помощью пневматического транспорта смесь подается в бункер-накопитель горячего песка. Под бункером размещают оборудование пылеудаления и охлаждения песка, после чего песок перемещается либо в бункер-накопитель, либо в приёмный бункер смесителя.

Современное оборудование регенерации смеси полностью автоматизировано, а пневматическая транспортировка песка не вызывает износа пневмонасосов и трубопроводов.

Отработанная AlpNet – смесь легко дробится механически, при этом образуется много пыли. Система пылеудаления, так же как и охлаждения должна быть спроектирована с достаточным запасом по производительности. При литье в смеси образуются щелочные соли металлов, которые присутствуют в виде пылевидных частиц в остаточной плёнке смолы. Эффективный помол смеси и мощная система пылеудаления создают предпосылки для достижения хороших значений прочности при использовании регенерированного песка.

Регенерацию AlpNet смеси также можно производить термическим способом. Смесь после дробления и просеивания поступает в смеситель, куда добавляются специальные добавки на водной основе и затем в печь, где остатки смолы сжигаются в кипящем слое при температуре выше 800°C. После этого охлаждённый песок можно использовать вновь в качестве свежего песка или механически смешивая с регенерированным песком. Выделяющаяся при регенерации смеси пыль оседает на опоры кабелей и опасна своим возгоранием. Пожар распространяется медленно и возникает из небольшого, почти не заметного пламени. Поэтому запылённые места регенерационного комплекса необходимо регулярно очищать от пыли [18].

### AlpNet при литье сталей

После выхода на рынок в 1982 году AlpNet процесс начали применять сначала при литье сталей. Являясь щелочным AlpNet процесс особенно хорошо подходит для щелочных марганцовистых и хромистых сталей. В литье марганцовистых сталей обычно используют кварцевый песок, а формы и стержни покрывают магнезитовыми покрытиями. Также низкоуглеродистые и низколегированные стали вследствие высокой температуры заливки хорошо подходят для AlpNet процесса. Связующее разлагается медленно также и при высоких температурах и давление газов в форме остается на низком уровне. Применение цирконовых покрытий при литье сталей наиболее распространено, за исключением литья марганцовистых сталей.

Типичными отливками из сталей являются части насосов и запорной арматуры, ножи дерево дробящего оборудования, корпуса и изнашивающиеся части землеройной и горнорудной техники, лопасти турбин электростанций, валы и валки для машиностроительной промышленности, литые части корпусов судов, танков. Самая крупная на сегодняшний день стальная

отливка, отлитая в форму, изготовленную AlpHaset процессом весит 100 т нетто. Вес брутто заливаемого металла составил 200 т. Вес наименьших стальных отливок составляет несколько сот граммов.

На сегодняшний день AlpHaset процесс позволил применение техники безопасной формовки наряду с лёгким также в среднетяжелом и тяжёлом литье стали. Наибольший вес полуформ при безопасной формовке превышает 20 т. Доля регенерированного песка в формовочной смеси при литье стали может составлять 70 – 90 %. При высоких требованиях к качеству поверхности отливок для облицовки форм и изготовления стержней используют свежий кварцевый или качественный хромитовый песок [18].

### ВЕТА-SET-процесс

Разработан фирмой Borden (Англия) в начале 80-х годов.

Суть процесса состоит в отверждении полифенолятов путем продувки смеси в оснастке парообразным эфиром - метилформиатом - в токе инертного носителя (воздуха или CO<sub>2</sub>).

При ВЕТА-SET- процессе используется аналогичное связующее - щелочной резольный полифенолят. Для отверждения используется метилформиат (метиловый эфир муравьиной кислоты) HCOOCH<sub>3</sub> - прозрачная бесцветная жидкость со сладковатым эфирным запахом. Устойчив на воздухе, легко воспламеняется, обладает слабо выраженным обще наркотическим действием.

ПДК на пары метилформиата в воздухе рабочей зоны в России не установлены, что свидетельствует не столько о его малотоксичности, сколько о невостребованности вплоть до последнего времени в качестве продукта большой химии.

Химизм процесса отверждения аналогичен ALPHA-SET-процессу, но отверждение смеси осуществляется парами метилформиата в холодной оснастке.

К достоинствам технологии относится хорошее качество литых поверхностей (сталь, чугун, цветные сплавы), отсутствие N и S в связующем, незначительное термическое расширение смеси, относительная влагоустойчивость др.

По сравнению с дорогостоящими технологиями для массового и крупносерийного производства (Cold-box-amin, FRC и др.) данная технология может находить применение для небольших серий стержней, хотя она не может сравниться с ними по прочности сразу после продувки и окончательной при одновременности отверждения стержня по всему объему [19].



Примерами импортных материалов служат ВЕТА-SET В 1 и метилформиат ВЕТА-SET ВН 50 (Furten-bach, Австрия). В России материалы для этой технологии поставляются фирмой ООО «Эктис-2» (г. Дзержинск).

Для крупносерийного или массового производства производится смола того же типа с отверждением стержней путем продувки их газообразным метилфор-миатом [«Бета-сет»-процесс]. Эти смолы называются АЛКАСЕТ СВ и АЛСАФЕН СВ (Уралхимпласт).

Связующим является щелочная резольная фенолоформальдегидная смола, аналогичная описанному выше связующему для процесса «Альфа-сет».

Метилформиат (метиловый эфир муравьиной кислоты)  $\text{HCOO-CH}_3$  - прозрачная бесцветная или светло-желтая жидкость с температурой кипения  $31,50^\circ\text{C}$  и температурой вспышки минус  $19^\circ\text{C}$ .

В состав смеси входит 1,0 - 2 мас.ч. связующего на 100 мас.ч. кварцевого песка или 0,7-1 мас.ч. для смеси на основе циркона или хромита.

Содержание связующего в указанных пределах зависит от типа песка - формы зерен, содержания мелких фракций, глинистой составляющей, требуемой прочности. При использовании регенерата его показатель ППП (потери при прокаливании) должен быть не выше 2%. Более высокий показатель требует применения большего количества связующего, что понижает текучесть и повышает вероятность образования дефектов отливок.

Приемлемо любое качественное уплотнение смеси — ручное, пескострельное, пескодувное, вибрационное. Условия и длительность перемешивания не должны приводить к существенной потере влаги. Потеря влаги снижает текучесть. Живучесть смеси высокая, для ее повышения нужно избегать потери влаги или излишков загрязняющих примесей.

Оптимальные прочностные свойства получаются при использовании кварцевого песка марок 1К1О3О2 или 016 при влажности не более 0,5- 1 %. Прочностные свойства смеси в отличие от других типов ХТС мало зависят от влажности песка и от содержания в нем окислов щелочных и щелочноземельных металлов, от влажности воздуха при хранении стержней. Живучесть зависит от температуры и условий хранения (таблица 21).

Из опыта работы следует, что прочность смеси достаточна для большинства стержней, в том числе и сложной конфигурации. Общая и поверхностная прочности несколько увеличиваются в процессе заливки из-за склонности композиции к дополнительному отверждению при небольшом нагреве.

Оптимальная температура песка  $18-30^\circ\text{C}$ . Время продувки стержня составляет 20 - 30 с, специальных средств для нейтрализации метилформиата не требуется, ПДК для него  $250 \text{ мг/м}^3$ , 4-й класс опасности. Теоретически

расход эфира составляет 20% от массы связующего. Фактически он бывает выше, так как зависит от конфигурации стержня, вентиляции ящика, качества уплотнения по разьему. Реальный расход метилформиата - 20 -40% от массы связующего.

Метилформиат является не катализатором, а реактивным компонентом механизма отверждения. Превышение его теоретического расхода не влияет на скорость и конечный уровень упрочнения. Скорость заметно зависит от распределения метилформиата в объеме стержня или формы. Она зависит также от соответствия количества газа размеру стержня и его конфигурации. Количество газа должно быть минимум 20% от массы связующего, в противном случае возможна недоотверждение.

Технологические свойства смесей для процесса «Бета-сет» [19].

Таблица 21 – Основные характеристики стержней

Содержание связующего, мас.ч.	Прочность на разрыв после выдержки, МПа			Живучесть, час	Газопроницаемость, ед.	Гзотворная способность, см <sup>3</sup> /Г
	30 с	1 час	24 часа			
1,5	0,7-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	8	Более 200	4-5
1,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	8	Более 200	7-8

Вывод:

Для изготовления форм и стержней выбран AlpHaset процесс. Основными критериями выбораAlpHaset процесса для изготовления форм и стержней стало:

- хорошим качеством поверхности
- скорость отверждения смеси регулируется типом отвердителя;
- используется без опочная формовка;
- универсальность;
- быстрое объемное отверждение;
- малый объём выделений паров;
- пониженная склонность к науглероживанию;
- меньшая чувствительность к влаге;
- низкая вероятность возникновения дефектов отливок типа просечек и горячих трещин;
- возможность применения любых наполнителей;
- незначительный запах при перемешивании и заполнении оснастки;
- ограниченная токсичность;

- водорастворимость связующего, возможность очистки смесителей водой;
- регенерация.

AlpHaset признан эффективным, щадящим к окружающей среде процессом формовки и изготовления стержней, который позволяет изготавливать ответственные стальные литые с хорошим качеством поверхности при небольших затратах труда на очистку и окончательную обработку. Таким образом, AlpHaset процессом можно заменить литье в оболочковые формы, а также, в некоторых случаях, точное литье, насколько это позволяет конструкция изделия.

## 7 Разработкатехнологии производства отливок из сплава 40X24H12СЛ

Так как стоимость сплавов с рением создаваемых с использование синтеза, значительно выше традиционных сплавов – они до сих пор находят применение. Средняя стоимость сплава без рения составляет 1-2 миллиона рублей за тонну, а сплавы с содержанием рения 12миллиона рублей за тонну.

Одним из них является сплав 40X24H12СЛ, (заменители: 35X23H7СЛ)

Классификация: Сталь для отливок коррозионностойкая

Вид поставки: отливки ГОСТ 4543-71.

Отливки из сплава 40X24H12СЛ используются: детали, работающие при высокой температуре и давлении (лопатки компрессоров и сопловых аппаратов, печные конвейеры, шнеки, крепежные детали и др.). Сталь жаростойкая до 1000 °С, жаропрочная, аустенито-ферритного класса [20].

Удельный вес: 7800 кг/м<sup>3</sup>

Термообработка: Закалка 1040 - 1060 °

Линейная усадка 2,7%

Таблица 22– Химический состав в % материала 40X24H12СЛ

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
до 0.4	0.5 - 1.5	0.3 - 0.8	11 - 13	до 0.03	до 0.035	22 - 26

Таблица 23 – Технологические свойства материала 40X24H12СЛ

Свариваемость:	без ограничений.
Флокеночувствительность:	не чувствительна.
Склонность к отпускной хрупкости:	не склонна.

Таблица 24 – Механические свойства при T=20 °С материала 40X24H12СЛ

Сортамент	Размер	Напр.	$s_b$	$s_T$	$d_5$	$y$	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
Отливки, ГОСТ 977-88	до 100		491	245	20	28		Закалка 1050°С,

Зарубежные аналоги марки стали 40X24H12СЛ

Япония SCH12, SCH13A,

Германия 1.4826, 1.4837

США HF, HH, J93503

Евросоюз GX40CrNiSi25-12

Англия 309C30, 309C35

Китай ZG35Cr26Ni12

Таблица 25 – Физические свойства материала 40X24H12СЛ

Т Град	Е 10 <sup>-5</sup> МПа	а 10 <sup>6</sup> 1/Град	l Вт/(м·град)	г кг/м <sup>3</sup>	С Дж/(кг·град)	Р 10 <sup>9</sup> Ом·м
20	1.96			7800		860
100		18.4				
200						
300						
400						
500	1.67					
600	1.57					
700	1.45					
Т	Е 10 <sup>-5</sup>	а 10 <sup>6</sup>	l	г	С	Р 10 <sup>9</sup>

### 7.1 Характеристика отливки представителя

В данной выпускной работе рассмотрена отливка – диск ступени турбины, из сплава 40X24H12СЛ, представленная на рисунке 44.

Основные элементы паровой турбины – корпус, сопла и лопатки ротора. Пар от внешнего источника по трубопроводам подводится к турбине. В соплах потенциальная энергия пара преобразуется в кинетическую энергию струи. Вырывающийся из сопел пар направляется на изогнутые (специально спрофилированные) рабочие лопатки, расположенные по периферии ротора. Под действием струи пара появляется тангенциальная (окружная) сила, приводящая ротор во вращение.

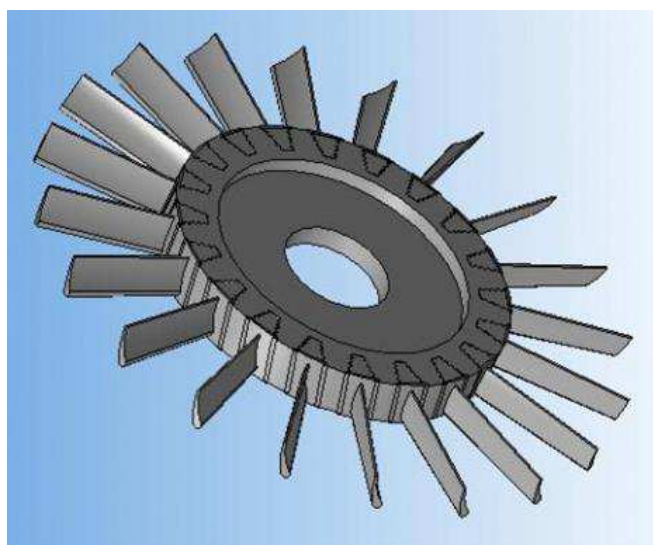


Рисунок 44 – Ступень турбины из сплава 40X24H12СЛ

Дискступени турбины, устанавливаемый на валу для закрепления на его окружности рабочих лопаток. Форма поперечных сечений дисков может быть коническая, гиперболическая и др. в зависимости от условий его работы.

Габаритные размеры дискаступени турбины, в разрезе представлены на рисунке 45

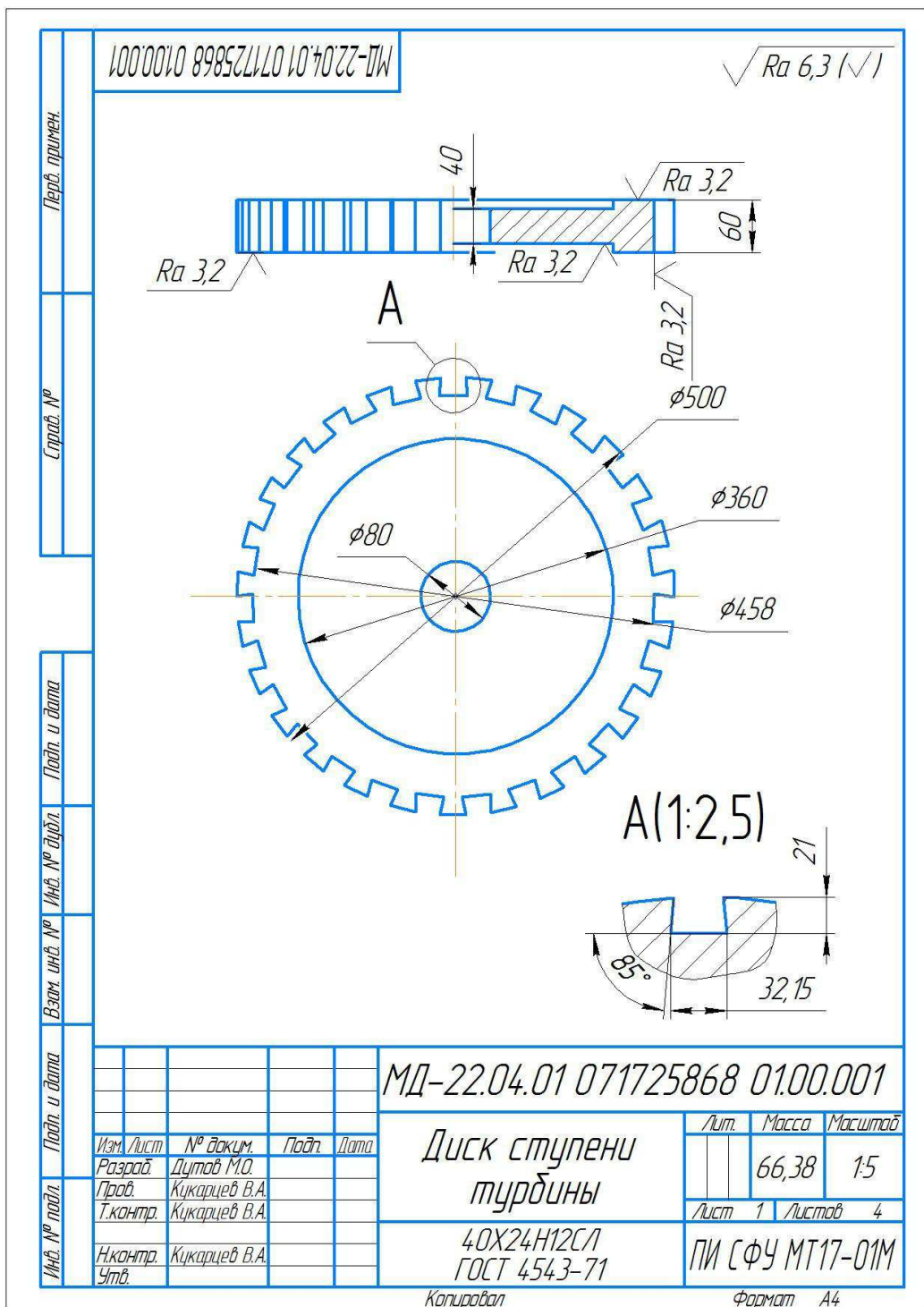


Рисунок 45 – Габаритные размеры диска ступени турбины, в разрезе из сплава 40X24H12СЛ

Разработан чертёж отливки, который представлен на рисунке 46.

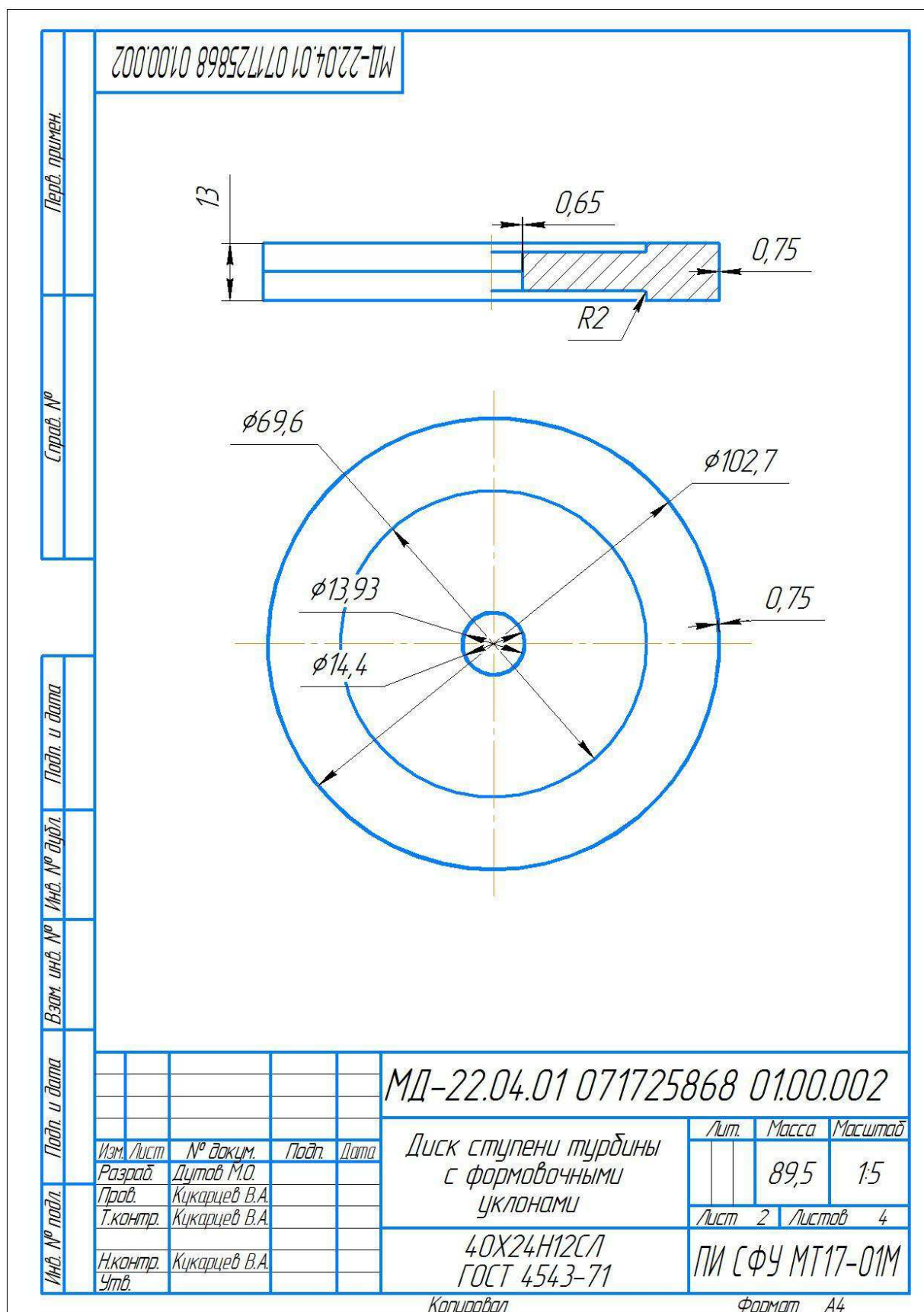


Рисунок 46 – Отливка с формовочными уклонами

## 7.2 Конструирование литниково-питающей системы с применением программ моделирования

Расчёт литниково-питающей системы выполнен исходя из следующих условий: масса отливки дискаступени турбины (с учётом припусков, для отливок, изготавливаемых в уплотняемых формах по ГОСТ Р 53464-2009) – 89,5 кг.

Число отливок в форме – 2.

Преобладающая толщина стенки отливки – 65мм.

Расчет элементов литниково-питающей системы при стационарной заливке производится в следующем порядке:

Прибыль выбрана закрытая полусферическая.

Диаметр сферы и верхнего сечения прибыли определяем по формуле:

$$D = 0,45 \sqrt[3]{(V_{\text{ж}})} + \delta, \quad (1)$$

где:  $V_{\text{ж}}$  – объем жидкого металла питаемого узла, мм<sup>3</sup>;

$\delta$  – толщина стенки – 65мм.

$$D = 0,45 \sqrt[3]{\frac{89,5}{2}} + 0,065 = 1,665 \text{ дм}$$

Диаметр прибыли  $D=16,65$  см

Высота прибыли находится в пределах (1,25-2)

$$h_{\text{пр}} = (1,25-2)D = 1,4 * 16,65 = 23,31 \text{ см.}$$

Массу прибыли без учета конусности найдем из выражения:

$$G_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}} * \gamma}{1000} = \frac{\pi}{4} D^2 \left( h_{\text{ц}} + \frac{D}{3} \right) \frac{\gamma}{1000}, \quad (2)$$

$$G_{\text{п}} = \frac{3,14}{4} 16,65^2 \left( 23,31 + \frac{16,65}{3} \right) \frac{7,8}{1000} = 48,99 \text{ кг}$$

Масса прибыли равна  $G_{\text{п}}=48,99$  кг



Принимаем массу литниковой системы без прибыли, равную  $0,14 \cdot G_0$ , согласно таблицы 26[21].

Таблица 26 – Масса литниковой системы без прибыли

$G_0$ , кг	10	10–100	100–1000	1000–5000	5000–10000	Свыше 10000
$G_L$ , кг	$0,2 G_0$	$0,10–0,15 G$	$0,08 G_0$	$0,05 G_0$	$0,05 G_0$	$0,04 G_0$

$$G_L = 0,14 \cdot 89,5 = 12,53 \text{ кг.}$$

Металлоемкость отливки составляет:

$$G = G_{\text{п}} + G_L + G_0 \quad (3)$$

$$G = 48,99 + 12,53 + 89,5 = 151,02 \text{ кг.}$$

Технологический выход годного:

$$\eta = \frac{G_0}{G} * 100 \%, \quad (4)$$

$$\eta = 89,5 / 151,02 * 100 = 59,26\%.$$

*Расчет времени заполнения*

Время заполнения отливки найдем по формуле:

$$\tau = \rho \sqrt[3]{\delta * G}, \quad (5)$$

Принимаем по таблице 27 значения коэффициента  $S = 1,5$  [21].

Таблица 27 – 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 в тонкостенные части отливки	1,5–1,6	1,6–1,8

Толщина стенки = 65 мм, металлоемкость отливки  $G = 151,02,1$  кг.

Тогда:

$$\tau = 1,5 \sqrt[3]{(65 * 151,02)} = 32,1 \text{ с.}$$

Высота отливки вместе с прибылью:

$$C = 65 + 233,1 = 298,1 \text{ мм.}$$

Скорость подъема металла в форме:

$$V = \frac{C}{\tau}, \quad (6)$$

$$V = \frac{298,1}{32,1} = 9,28 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

Лимитирующим сечением сужающихся литниковых систем является сечение питателей. Расчет сечения питателей производится по формуле Б. Ованна:

$$\sum F_{\text{пит}} = \frac{3,2 * G}{\tau * \mu \sqrt{H_p}}, \quad (7)$$

Расчетный напор металла определяется из соотношения:

$$H_p = H - \frac{h_{\text{от}}}{2}, \quad (8)$$

где:  $H$  –расчет от места подвода метала к отливке до уровня разъема ковша, мм;

$h_{\text{от}}$  –высота отливки при положении при заливке, мм;

Необходимо определить размер опок: Для верхней опоки:

$$H_{\text{в.о}} = \frac{h_{\text{от}}}{2} + h_{\text{п}} + a = (65/2) + 233,1 + 90 = 355,6 \text{ мм}$$

Необходимо определить размер опок: Для нижней опоки:

$$H_{н.о} = \frac{h_{от}}{2} + b = (65/2) + 90 = 122,5 \text{ мм}$$

Стандартный размер опоки, которые подходят для отливки:

$$H_{в.о} = 360$$

$$H_{н.о} = 150$$

Принимаем опоку высотой 360 мм, тогда первоначальный напор составит:

$$H = 360 \text{ мм}$$

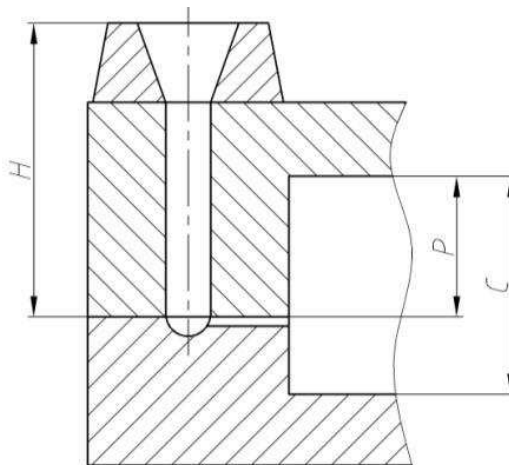
Расчетный напор при заливке сифоном равен:

$$H_p = H - \frac{C}{2}$$

где  $H$  – высота опоки с воронкой, см;  $C$  – высота отливки с прибылью, см.

$$C = 6,5 + 23,31 = 29,81 \text{ см}$$

$$H_p = 36 - \left(\frac{29,81}{2}\right) = 36 - 14,905 = 21,095 \text{ см}$$



*Расчет литниковой системы*

Сечения питателя:

$$\sum F_{\text{пит}} = \frac{3,2 * 151,02}{32,1 * 0,32 * \sqrt{21,095}} = 10,24 \text{ см}^2.$$

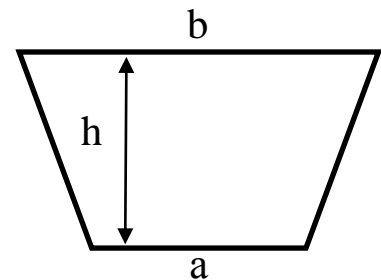
Принимаем количество питателей на одну отливку равное двум, тогда сечение одного питателя  $-5,12\text{см}^2$

Определим размеры питателя по площади [21].

a,b,h – находим по формуле  $\frac{a+b}{2} * h = F_{\text{п}}$

$$\frac{1,8 + 2,86}{2} * 2,2 = 5,12$$

$$a=1,8 \text{ см}; b=2,86 \text{ см}; h=1,5\text{см}$$



Общее сечение всех питателей в форме для двух отливок составляет:

$$\sum F_{\text{пит}} = 10,24 * 2 = 20,48 \text{ см}^2$$

Определение площади поперечного сечения литникового хода и стояка производится из соотношения:

$$\sum F_{\text{пит}} : F_{\text{л.х}} : F_{\text{с}} = 1 : 1,2 : 1,4.$$

Согласно соотношению, сечение общего стояка:

$$\sum F_{\text{с}} = 1,4 \sum F_0 = 1,4 * 20,48 = 28,67 \text{ см}^2$$

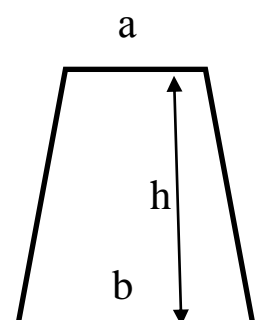
Определим диаметр стояка по площади.

$$R = \sqrt{\frac{F_{\text{ст}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{28,67}{3,14}} = \sqrt{9,13} = 3,021$$

$$D = R * 2 = 3,021 * 2 = 6,042 \text{ см}.$$

Сечение литникового хода:

$$\sum F_{\text{л.х}} = 1,2 \sum F_0 = 1,2 * 20,48 = 24,57 \text{ см}^2$$



Определим размеры литникового хода по площади.

a,b,h – находим по формуле  $\frac{a+b}{2} * h = F_{\Pi}$

$$\frac{6,042 + 6,5}{2} * 3,918 = 24,57$$

$$a=6,042 \text{ см}; b=6,5 \text{ см}; h=3,918 \text{ см}$$

От каждой ветви литникового хода питаются только две отливки.

Для расчета литниковой воронки берем значение:

$$d_{\text{ст. в.}} = 6,042 + 0,2 = 6,242 \text{ см},$$

$$D = 2,7 * 6,242 = 16,85 \text{ см}$$

$$D = H_{\text{в}} = 16,85 \text{ см}$$

Окончательно имеем:

$$F_{\text{пит}} = 5,12 \text{ см}^2,$$

Кол -во пит. = 4 шт.

$$\sum F_{\text{пит}} = 20,48 \text{ см}^2$$

$$F_{\text{л.х}} = 24,57 \text{ см}^2,$$

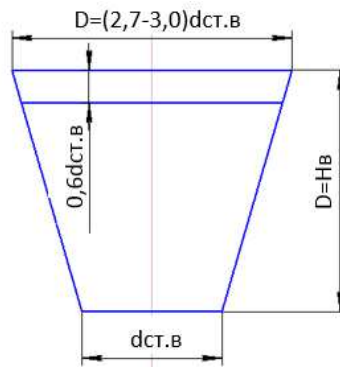
Кол -во = 1 шт.

$$\sum F_{\text{л.х}} = 24,57 \text{ см}^2$$

$$F_{\text{с}} = 28,67 \text{ см}^2$$

Кол -во = 1 шт.

$$\sum F_{\text{ст}} = 28,67 \text{ см}^2$$



Отливка с элементами литниково-питающей системой, выполненная в Компас 3D, представлена на рисунке 47.

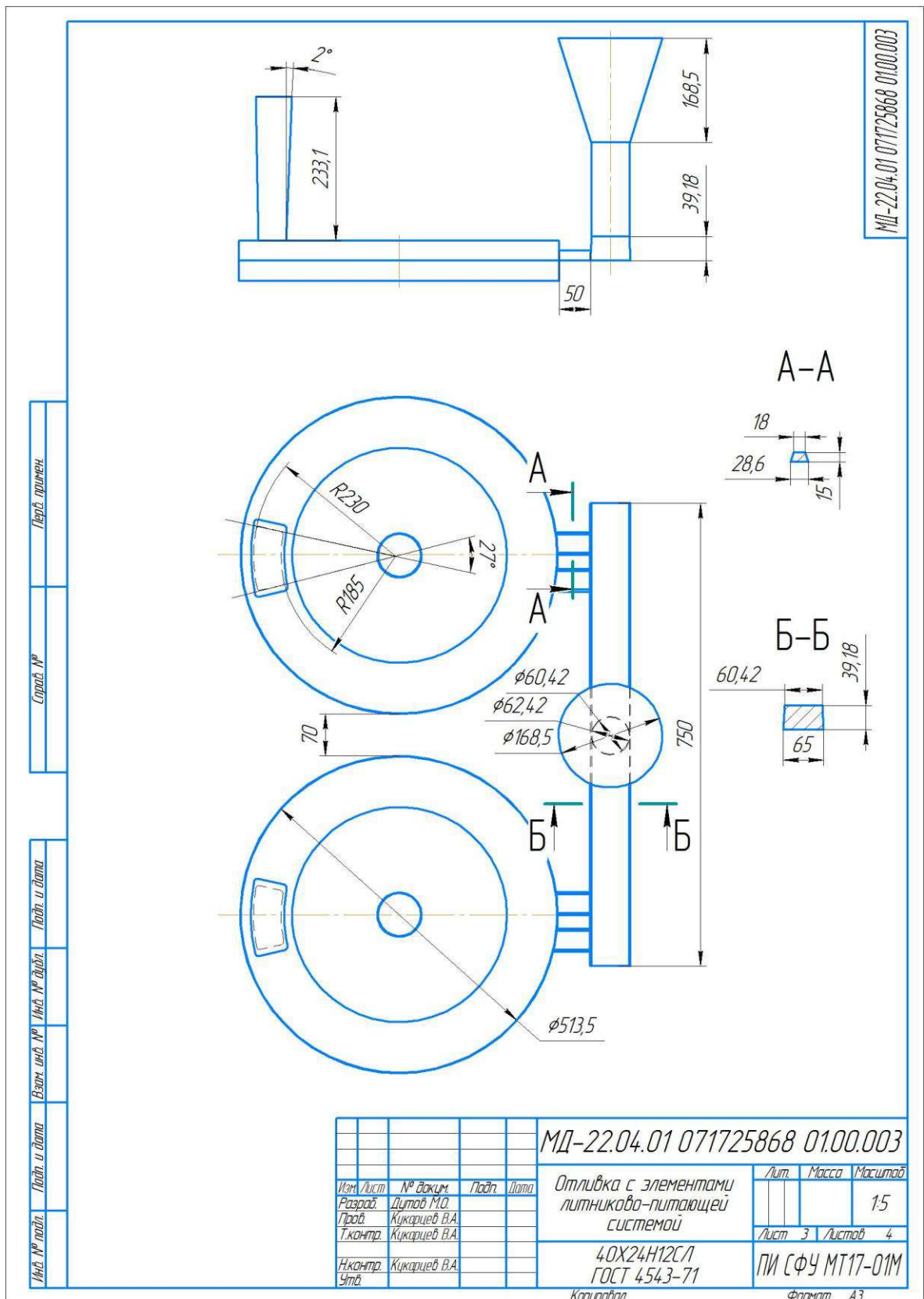


Рисунок 47 –Чертеж отливки, с элементами литниково питающей системой  
Для определения правильности разработанной литниково-питающей системы применим программу моделирования LVMFlowCV.

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 LVMFlowCV состоит из следующих приемов и этапов:

1. Конвертация геометрии отливки в формат LVMFlowCV.
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.

Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в SolidWorks, представлена на рисунке 48.

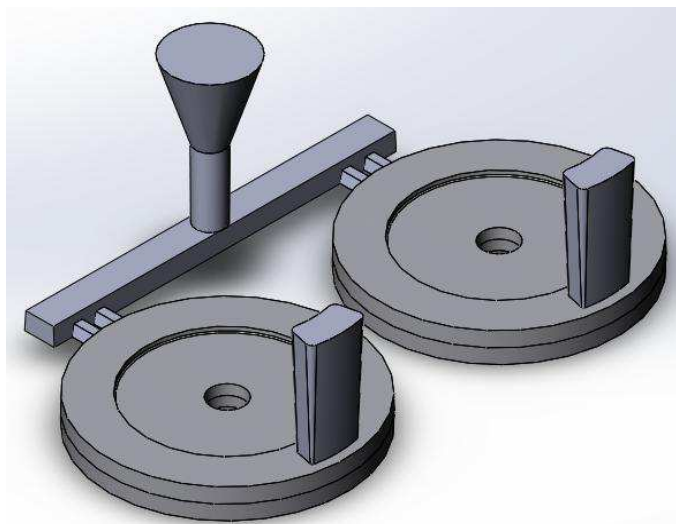


Рисунок 48 - Отливка с литниково-питающей системой, выполненная в SolidWorks

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



В LVMFlowCV 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);
- 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 твердожидкой 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 [20].

Результаты моделирования (рисунок 49) показывают, в каких местах возможно образование дефектов усадочного характера.

По данному изображению можно провести анализ дефектов в отливке. Имеется виды отливки сбоку, сверху, спереди и в изометрии. Все виды имеют рентгеновскую прозрачность, и все дефекты проецируются на данный вид. Исходя из этого, можно сделать анализ, что отливка является негодной, так как содержание дефектов достаточно велико. Необходимо проводить новое исследование.

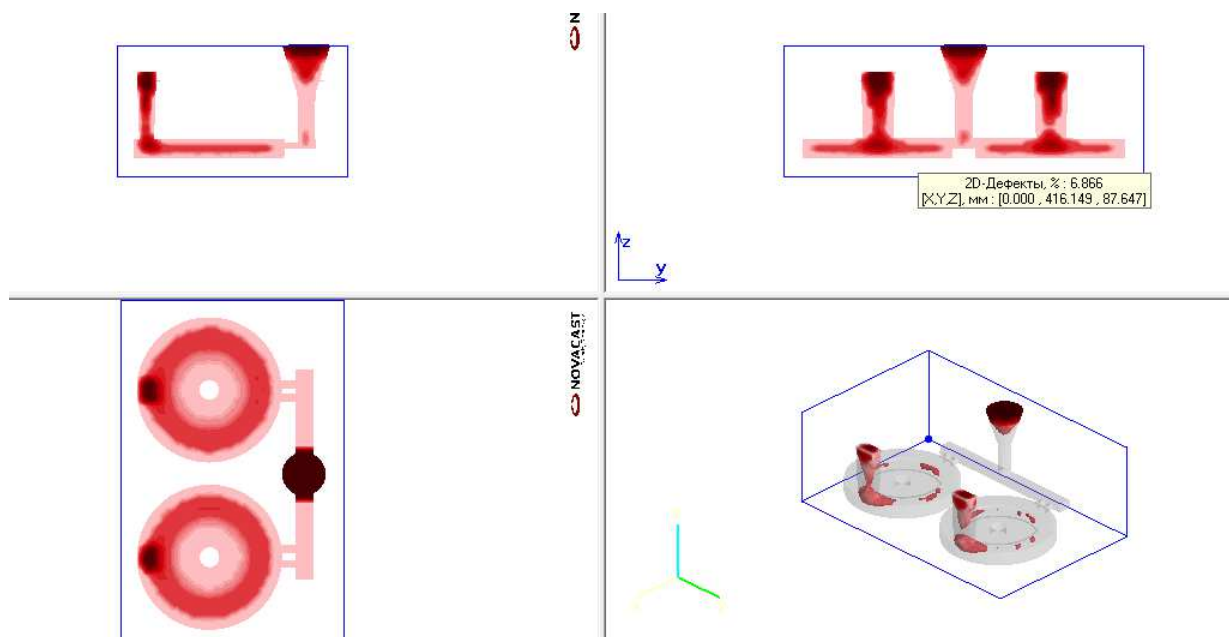


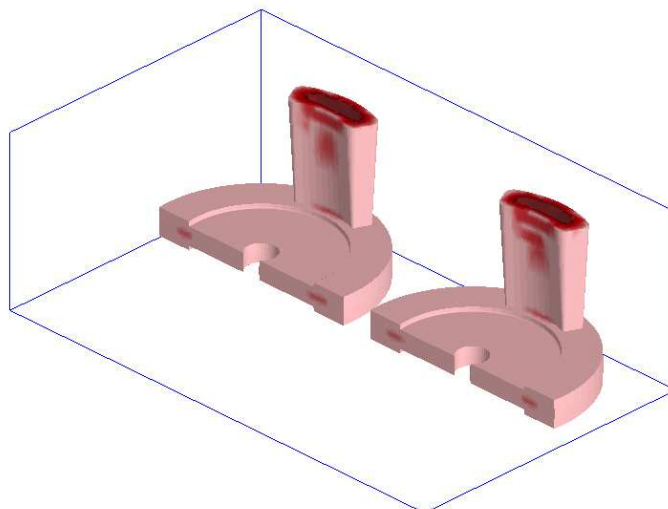
Рисунок 49 – Результат моделирования разработанной литниково-питающей системы

Из полученных результатов, при моделировании отливки следует вывод: данная литниковая система, не обеспечивает бездефектную заливку. В связи с этим, было принято решение. Изменить высоту прибыли, конфигурацию прибыли, размеры шлакоуловителя и питателя.

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

В результате таких действие изменится выход годного.

Поэтапное изменение ЛПС(рисунок50)



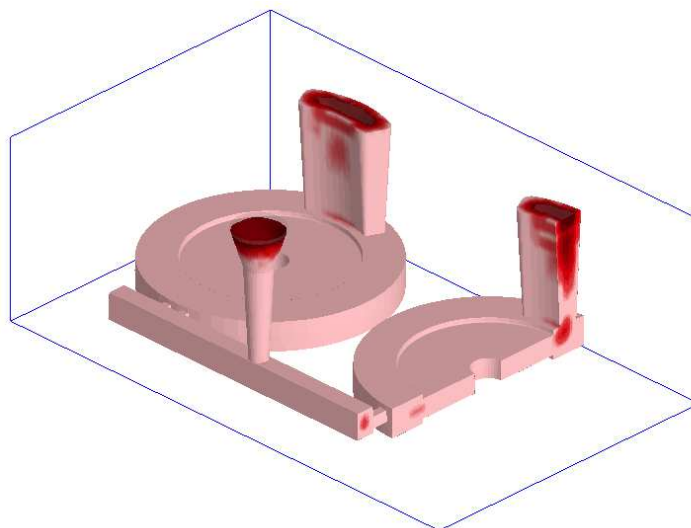


Рисунок 50 – Отливки с дефектами после изменения ЛПС

После множества заливок было принято решение поменять конфигурацию прибыли так ранее выбранная прибыль не обеспечивала необходимое качество отливки (рисунок 51)

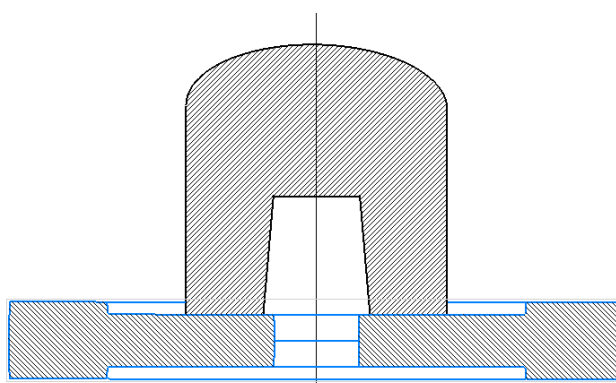


Рисунок 51 – Колпаковая прибыль

На рисунке 52 показан чертеж отливки с новыми элементами литниково-питающей системы.

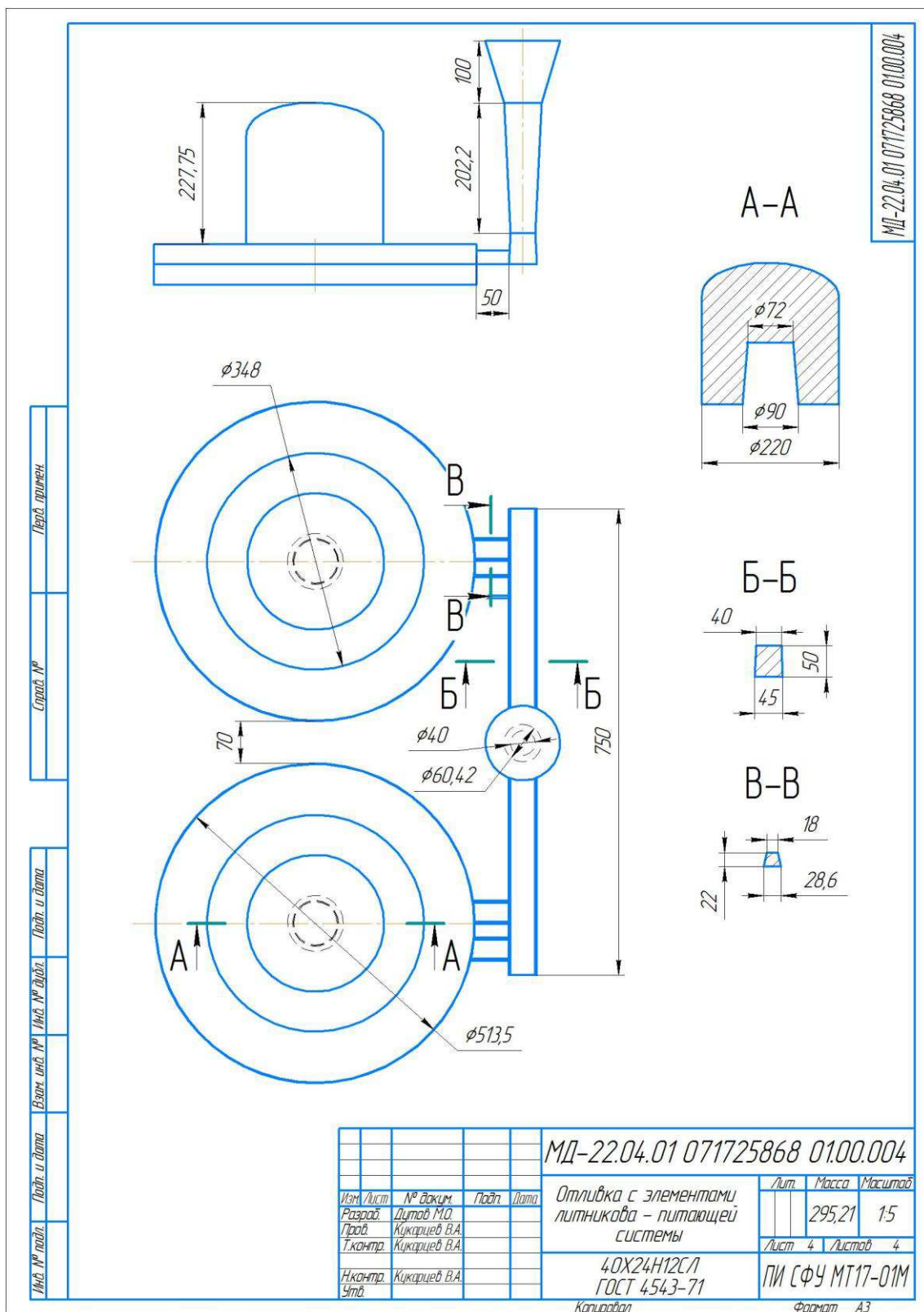


Рисунок 52 – Чертеж отливки, с элементами литниково-питающей системы

С применением данной прибыли качество отливки увеличилось (рисунок 53) судя по полученному изображению вся усадка ушла в прибыль, но данный

результат можно улучшить, изменив размер прибыли, что очень сказывается на выходе годно.

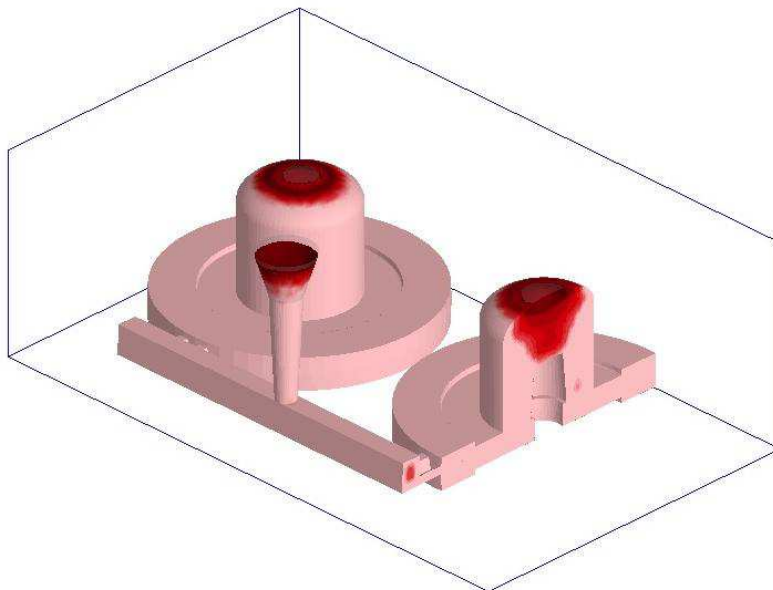


Рисунок 53 – Качественная отливка

Изменив размеры ЛПС производится полный пересчет данных с получением нового выхода годного.

Следовательно, размеры питателя составляют:

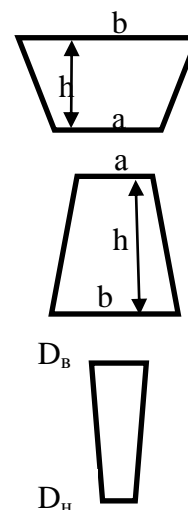
$$a=1,8 \text{ см}; b=2,86 \text{ см}; h=2,2\text{см}$$

Размеры литникового хода:

$$a=4 \text{ см}; b=4,5 \text{ см}; h=5 \text{ см}$$

Размеры стояка:

$$D_{\text{верхний}}= 6,042 \text{ см}; D_{\text{нижний}} = 4 \text{ см}$$



Выход годного при такой конфигурации ЛПС равен:

$$\eta = \frac{161,56}{295,21} * 100 \approx 54,73 \%$$

Согласно таблицы 30 технологический выход годного попадает в установленные пределы

Таблица 28 – Ориентировочный технологический выход годного для отливок из углеродистых и низколегированных сталей

Тип отливок	Масса отливок, кг	Преобладающая толщина стенок, мм	Технологический выход годного, %	
			Прибыли открытые	Прибыли закрытые полушаровые
Мелкие отливки: ответственные	До 100	До 20	54-62	59-67
		20-50	53-60	58-65
		Св. 50	52-58	57-63

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

Мною разработана схема технологического процесса для изготовления отливок «Диск ступени турбины», рисунок 54.

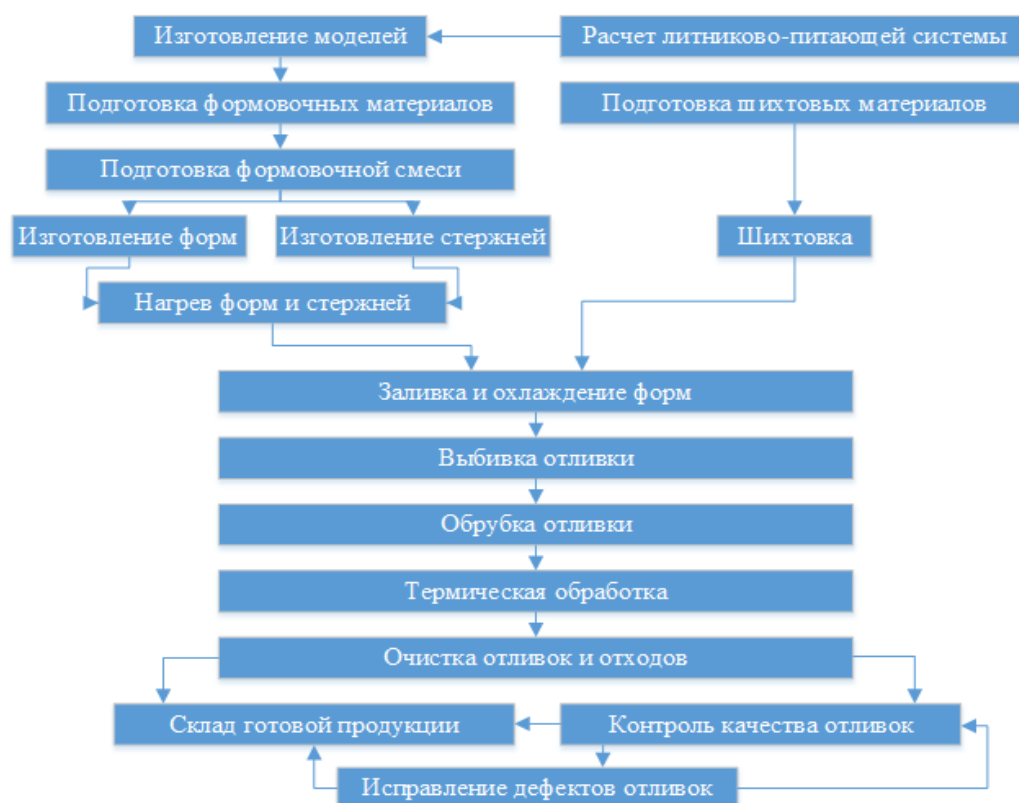


Рисунок 54 – Схема технологического процесса изготовления отливок «Диск ступени турбины»

Исходя из этой схемы, для изготовления форм, мною выбрано оборудование фирмы Omega.

Таблица 29 – Технические характеристики смесителей Spartan II

	Производительность т/ч	Мощность привода кВт	Мощность насоса кВт	A	B	C	D	E	F	G	Скорость вращения вала об/мин
Spartan 203P	1-3	3	0,43	1479	587	725	642	1038	1588	500	720
Spartan 205P	3-6	4	0,43	2855	1138	1492	1352	1368	1963	600	520

### Окончание таблицы 29

Spartan 210P	5-12	4	0,43	3105	1178	1695	1530	1324	2093	700	520
Spartan 220P	10-20	11	0,43	3082	820	1965	1750	1281	2080	750	520
Spartan 235P	20-35	18,5	0,43	3331	985	2026	1811	1296	2200	750	520

Для более оптимальной работы из таблицы 29 был выбран смеситель Smartn. 205Pc производительностью 3-6 тонн в час что больше всего подходит для нас.

### Работа с Формой

Каруселькомпактная и экономичная альтернатива формовочной системе Fast-loop (таблица 30).

Таблица 30 – Габаритные размеры карусели

Плита		Размер 1	Размер 2	Размер 3	Размер 4
	Длина	800	1000	1200	1600
	Ширина	600	800	1000	1200
	Глубина полуформы	300	350	425	475
Машина	А	2943	3780	4595	5465
	В	515	625	625	625

На рисунке 55 изображена шестипозиционная каруселью



Рисунок 55 – Шести позиционная карусель



На рисунке 56 изображен вибростол.



Рисунок 56 – Вибростол

Согласно таблице 31 по максимальной нагрузке подходит вибростол марки «Н»

Таблица 31 – Габаритные размеры вибростолов

Модель	A	B	C	D	E	Максимальная нагрузка, кг
AAA Уплотнение	1070	610	500	820	520	300
AA	1525	610	570	975	580	955
A	1675	610	560	1125	580	1305
C	1555	762	560	1290	580	915
D	1555	762	560	1290	580	1280
G	1820	915	560	1590	590	835
H	1820	915	735	1590	765	1210
J	1820	915	735	1590	765	2706
M	2500	915	760	2270	790	4755
P	2500	1210	760	2270	790	4755
Q	3590	2500	1100	3130	1150	7500
R	4200	2500	1100	3380	1150	10000

### Кантователи, передаточные тележки и сталкиватели форм

Полуавтоматические кантователи для работы с ручной формовочной линией. Полностью автоматические кантователи с приводным ленточным конвейером для встраивания в линии Fast-loop или карусели. Все автоматические кантователи – гидравлические и снабжены вибратором, что помогает освобождению формы (доступно в качестве опции для полуавтоматических решений).

## Регенерация Смеси

Низкоуровневая система регенерации «Gammavator» и «LL» (LowLevel)

- Размер форм до 2 х 2 м

- Вес форм до 3 т/час

Модель стержневой машина SA5M-I была выбрана из таблицы 32, выбор производился по максимальному размеру ящика.

Таблица 32 – Основные характеристики стержневых машин

Модель	Модель Макс. размер ящика (мм)	Вес стержня (кг)				Габариты	
		Одиночный надув	Двойной надув	Сухой цикл (сек)	Длина (мм)	Ширина (мм)	Высота (мм)
SA2.5D	420 x 380 x 280	3.5	6	20	1388	1055	2260
SA2.5SD	420 x 380 x 280	3.5	6	26	1798	1506	2260
SA5M-I	630 x 410 x 400	7	12	24	2417	2280	2453
SA5SM-I	630 x 410 x 400	7	12	24	2837	2280	2453
COMPACT 12	800 x 500 x 530	16	31	30	2797	2341	2545
COMPACT 12S		16	31	36	3167	2341	2545
B12GS/I	810 x 500 x 530	16	31	24	3792	2341	2768
B25GS/I	810 x 700 x 700	35	68	30	3792	2341	2789
B40GS/I	810 x 700 x 700	60	110	35	3792	2341	2789
B60GS/I	950 x 900 x 720	90	160	40	3792	2720	3300
TM100S	1000 x 1000 x 950	140	250	40	6100	2480	4080
Только для ящиков с горизонтальным разъемом							
B12GS/J/I	600 x 600 x 650	16	31	18	3792	2341	2768
B25GS/J/I	600 x 600 x 800	35	68	18	3792	2341	2789

Была выбрана автоматическая формовочная линия FastLoop (рисунок 57).



## Термообработка

Обрезка прибылей и элементов литниково-питающей системы производится газовыми резаками, что приводит к изменению структуры металла в месте реза. Для выравнивания структуры применяется отжиг отливок в термических печах, таких как СДО. На рисунке 58, представлена печь СДО для термообработки отливок.

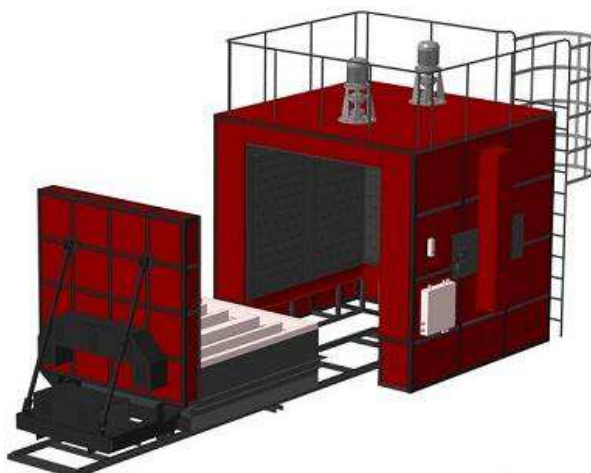


Рисунок 58- Печь СДО для термообработки отливок

## Очистка дробеметная

Основными операциями очистки отливок являются: очистка их поверхностей от пригоревшей формовочной и стержневой смеси; удаление элементов литниково-питающей системы, в том числе и прибылей; удаление заливов; обрубка и зачистка. На рисунке 59 представлена камера очистная дробеметная периодического действия



Рисунок 59 - Камера очистная дробебетная периодического действия

Таблица 33 – Необходимое оборудование

п/н	Наименование оборудования
1	Плавильная печь Inductotherm с объемом тигля 500 кг
2	Печь термообработки СДО
3	Камера очистная дробебетная
4	Стержневая машина SA5M-I «OMEGA»
5	Установка регенерации 20HL «HighLevel» «OMEGA»
6	Кантователь, размер 4 «OMEGA»
7	Вибростол модель Н «OMEGA»
8	Формовочная линия Fast-Loop
9	Смеситель Spartan II «Spartan 205P»

Всё необходимое оборудование сведены в общую таблицу 33

## 9 Расчёт норм расхода основных материалов

Для того, чтобы произвести расчеты, необходимо установить исходные данные.: выход годного (54,73%), брак (10%), угар (5%), литники и прибыли (25,77%), безвозвратные потери (3%), скрап (2,5%). Выход годного составляет 1000 кг, в следствии чего для выплавки необходимо 1827,151471 кг. металлозавалки, которая рассчитывается по формуле: [23].

$$\frac{1000}{54,73} = \frac{x}{100} \Rightarrow x = \frac{100000}{54,73} = 1827,151471 \quad (9)$$

Заносим все данные в таблицу 34.

Таблица 34 – Исходные данные для расчета металлозавалки

40X24H12СЛ						Количество Металла в год кг
Si	Mn	Ni	Cr	Cu	C	
0,5- 1,5	0,3- 0,8	П-ІЗ	22-26	до 0,3	до 0,4	
Данные		%	кг			1000
Выход годного		54,73	1000			Количество металла необходимое для плавки, кг
Брак		10	182,7151471			
Угар		4	73,08605883			
Литники и прибыли		25,77	470,856934			
Безвозвратные потери		3	54,81454413			
Скрап		2,5	45,67878677			1827,151471
итог:						1827,151471

Далее производим расчет шихтовых материалов:

- на свежих материалах и ломе;
- на свежих материалах, возврате и ломе;
- на свежих материалах, возврате, ломе-1и ломе-2;

Процент возврата взят из исходных данных, которые использовались при расчете металлозавалки.

На примере одной таблице производим расчет шихтовых материалов.

Расчет шихтовых материалов на свежих материалах и ломе начинается с разбора химического состава основного сплава (40X24H12СЛ), который необходимо получить. Вносим в таблицу все элементы с процентным

содержанием в материале. Для получения качественных расчетов содержание химических элементов берем в середине их допуска.

В качестве основной шихты берем лом 40X13, выбранный из ГОСТ 2787-75 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные» относящийся к категории Б-28. Вносим в таблицу все элементы химического состава с процентным содержанием в материале. Усвоение лома берем 99%

Содержание лома в шихте изначально берем 69,7%, далее будем периодически его менять что бы после добавления свежих материалов процентное содержание не превышало 100% .

Теперь, зная процентное содержание каждого элемента в шихте, усвоение и процентное содержание самого лома в шихте. Посчитаем процентное содержание каждого элемента в шихте лома по формуле:

$$Si_{ш} = \frac{Si_{м} * C_{ш} * Si_{усв}}{10000} \quad (10)$$

$$Si_{ш} = \frac{0,6 * 69,7 * 98}{10000} = 0,414 \%$$

Где  $Si_{ш}$  – содержание кремния в шихте,  $Si_{м}$  – содержание кремния в материале,  $Si_{усв}$ – усвоение лома,  $C_{ш}$ – Содержание в шихте самого лома.

По формуле 10, так же рассчитаем содержание в шихте остальных материалов и внесем в таблицу.

Далее, для того что бы попасть в середину допуска химического состава элементов, необходимо отнять от предела допуска получаемого сплава, получившееся содержание в шихте элемента. Выявленную разницу добавить в виде свежего материала. Свежие материалы так же берутся по госту.

В саму таблицу вносятся данные о процентном содержании материала в шихте и процентном содержании в материале. Процентное содержание материала в основной шихте рассчитывается по формуле:

$$C_{ш} = \frac{Mn_{ш} * 10000}{Mn_{усв} * Mn_{м}} \quad (11)$$

$$C_{ш} = \frac{1,9389 * 10000}{99 * 98,8} = 1,96244104$$

Данные расчеты необходимо произвести для всех свежих материалов и внести в таблицу. Далее после расчетов необходимо посчитать угар марганца, который равен 15% от содержания в шихте.

Основная задача при расчете угара заключается в том, что необходимо добавить определенное количество свежих материалов так, чтобы после угара, содержание химического элемента было в середине его допуска.

Далее рассчитываем остальные таблицы 35,36,37, аналогичным способом.

Таблица 35 – Расчет шихтовых материалов на свежих материалах и ломе

Наименование шихтовых материалов	Содержание в шихте %	Si		Mn		Ni		Cr		Cu		C		Усвоение %
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	
		Лом 40X13	69,7	0,6	0,41402	0,6	0,414018	0,6	0,42242	13	8,97039			
Угар		0	0	15	0,35294	0	0	0	0	0	0	0	0	
С учетом угара					2,000									
Kp0 (кремний)	0,605203255	98,8	0,58598	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98
Mn 998 (марганец)	1,962441044	0	0	99,8	1,9389	0	0							99
X99(Хром)	15,49124923	0	0	0	0	0	0	99	15,02961	0	0	0	0	98
П-803(т.углерод)	0,126505459	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,12399	99
НП2 (Никель)	11,81264744	0	0	0	0	99	11,5776			0	0	0	0	99
M2(Медь)	0,309214595	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,3	0	0	98
<b>Итого:</b>	<b>100,007261</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>11-13</b>	<b>12</b>	<b>22-26</b>	<b>24</b>	<b>до 0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>до 0,4</b>	<b>0,4</b>	

Таблица 36 – Расчет шихтовых материалов на свежих материалах, возврате и ломе

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %	Si		Mn		Ni		Cr		Cu		C		Усвоение %
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	
		Лом 40X13	46,8	0,6	0,27518	0,6	0,275184	0,6	0,27518	13	5,96232			
Возврат 40X24Н12СЛ	32,5	1	0,32175	2	0,6435	12	3,861	24	7,722	0,3	0,09653	0,4	0,1287	99
Угар		0	0	15	0,352943	0	0	0	0	0	0	0	0	
С учетом угара					2,000									
Kp0 (кремний)	0,412082362	98,8	0,40307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
Mn 998 (марганец)	1,451656849	0	0	99,8	1,434266	0	0							99
X99(Хром)	10,52513009	0	0	0	0	0	0	99	10,31568	0	0	0	0	99
П-803(т.углерод)	0,089627589	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,08784	99
НП2 (Никель)	8,023483318	0	0	0	0	99	7,86382			0	0	0	0	99
M2(медь)	0,207606367	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,20348	0	0	99
<b>Итого:</b>	<b>100,0095866</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>11-13</b>	<b>12</b>	<b>22-26</b>	<b>24</b>	<b>до 0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>до 0,4</b>	<b>0,4</b>	

Таблица 37– Расчет шихтовых материалов на свежих материалах, возврате, ломе-1 и ломе-2

Наименование шихтовых материалов	Содержание в Шихте %	Si		Mn		Ni		Cr		Cu		C		Усвоение %
		В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	В мат.	В шихте	
		Лом Х25Н20	40,1	1	0,39298	2	0,78596	18,5	7,27013	22,5	8,84205			
Лом 40Х13	20,2	0,6	0,11878	0,6	0,118776	0,6	0,11878	13	2,57348			0,4	0,07918	98
Возврат 40Х24Н12СЛ	32,5	1	0,3185	2	0,637	12	3,822	24	7,644	0,3	0,09555	0,4	0,1274	98
Угар		0	0	15	0,352943	0	0	0	0	0	0	0	0	
С учетом угара					2,000									
Кр0 (кремний)	0,175311906	98,8	0,16974	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98
Мн 998 (марганец)	0,821050181	0	0	99,8	0,811214	0	0							99
Х99(Хром)	5,092218099	0	0	0	0	0	0	99	4,94047	0	0	0	0	98
П-803(т.углерод)	0,138599258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,13447	98
НП2 (Никель)	0,813331272	0	0	0	0	99	0,78909			0	0	0	0	98
М2(медь)	0,210729746	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0,20445	0	0	98
<b>Итого:</b>	<b>100,0512405</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>11-13</b>	<b>12</b>	<b>22-26</b>	<b>24</b>	<b>до 0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>до 0,4</b>	<b>0,4</b>	

## 2.2 Нормы расхода материалов и расчет стоимости

Далее произведем расчет нормы расхода материалов и расчет стоимости:

- на свежих материалах и ломе;
- на свежих материалах, возврате и ломе;
- на свежих материалах, возврате, ломе-1 и ломе-2;

Полученные результаты процентного содержания в шихте всех компонентов переносим в таблицу 38 норм расходов. Напротив, каждого элемента указываем номер госта. Посчитаем массу каждого элемента с учетом металлозавалки и выхода годного, внесем в таблицу 38.

Найденные в интернете данные о стоимости каждого элемента также вносим в общую таблицу 38. Таблицы 39 и 40 выполняем идентично таблице 38

Таблица 38 – Норма расхода материалов и расчет стоимости на свежих материалах и ломе

Наименование	Норма РАСХОДА		Загрз. масса	Цена за кг.(рубли)	Общая сумма	
	Гост, ТУ	норма расхода				
		%				кг/Г
Лом 40Х13	ГОСТ 2787-75	69,7	697	1273,5246	10	12735,25
Х99(Хром)	ГОСТ 5905 - 2004	15,491	154,912	283,049	730	206625,47
П-803(т.углерод)	ГОСТ 16099 - 80	0,127	1,265	2,311	25	57,79
Кр0 (кремний)	ГОСТ 2169 - 69	0,605	6,000	10,963	240	2631,10
Мн 998 (марганец)	ГОСТ 6008 - 90	1,962	19,624	35,857	140	5019,95
НП2 (Никель)	ГОСТ 492 - 2006	11,813	118,126	215,835	3550	766214,11
М2(медь)	ГОСТ 25442 - 82	0,309	3,092	5,650	320	1807,94
	Итого:		1000,021	1827,189	<b>995091,60</b>	
	Разбег		-0,021	-0,038		

Таблица 39 – Норма расхода материалов и расчет стоимости на свежих материалах, возврате и ломе



Норма РАСХОДА				Загрз. масса	Цена за кг.(рубли)	Общая сумма
Наименование	Гост, ТУ	норма расхода				
		%	кг/Г			
Лом 40Х13	ГОСТ 2787-75	46,8	468	855,107	10	8551,07
Возврат 40Х24Н12СЛ	ГОСТ 5632 - 72	32,5	325	593,824	35	20783,85
Х99(Хром)	ГОСТ 5905 - 2004	10,525	105,251	192,310	730	140386,35
П-803(т.углерод)	ГОСТ 16099 - 80	0,090	0,896	1,638	25	40,94
Кр0 (кремний)	ГОСТ 2169 - 69	0,412	4,121	7,529	240	1807,05
Мп 998 (марганец)	ГОСТ 6008 - 90	1,452	14,517	26,524	140	3713,36
НП2 (Никель)	ГОСТ 492 - 2006	8,023	80,235	146,601	3550	520434,24
М(медь)	ГОСТ 25442 - 82	0,208	2,076	3,793	320	1213,85
	Итог:		1000,096	1827,327	<b>695123,65</b>	
	Разбег		-0,096	-0,175		

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 1652,892562 кг.

Таблица 40 – Норма расхода материалов и расчет стоимости на свежих материалах, возврате, ломе-1 и ломе-2

Норма РАСХОДА				Загрз. масса	Цена за кг.(рубли)	Общая сумма
Наименование	Гост, ТУ	норма расхода				
		%	кг/Г			
Лом Х25Н20	ГОСТ 2787-75	40,1	401	732,688	80	58615,02
Лом 40Х13	ГОСТ 2787-75	20,2	202	369,085	10	3690,85
Возврат 40Х24Н12СЛ	ГОСТ 5632 - 72	32,5	325	593,824	35	20783,85
П-803(т.углерод)	ГОСТ 16099 - 80	0,139	1,386	2,532	25	63,31
НП2 (Никель)	ГОСТ 492 - 2006	0,813	8,133	14,861	3550	52755,82
Кр0 (кремний)	ГОСТ 2169 - 69	0,175	1,753	3,203	240	768,77
Мн998 (марганец)	ГОСТ 6008 - 90	0,821	8,211	15,002	140	2100,26
Х99(Хром)	ГОСТ 5905 - 2004	5,092	50,922	93,043	730	67921,05
М2(медь)	ГОСТ 25442 - 82	0,211	2,107	3,850	320	1232,11
	Итог:		1000,512	1828,088	<b>207931,04</b>	
	Разбег		-0,512	-0,936		

Полученные результаты сведем в общую таблицу стоимости расходов и построим график расходов.

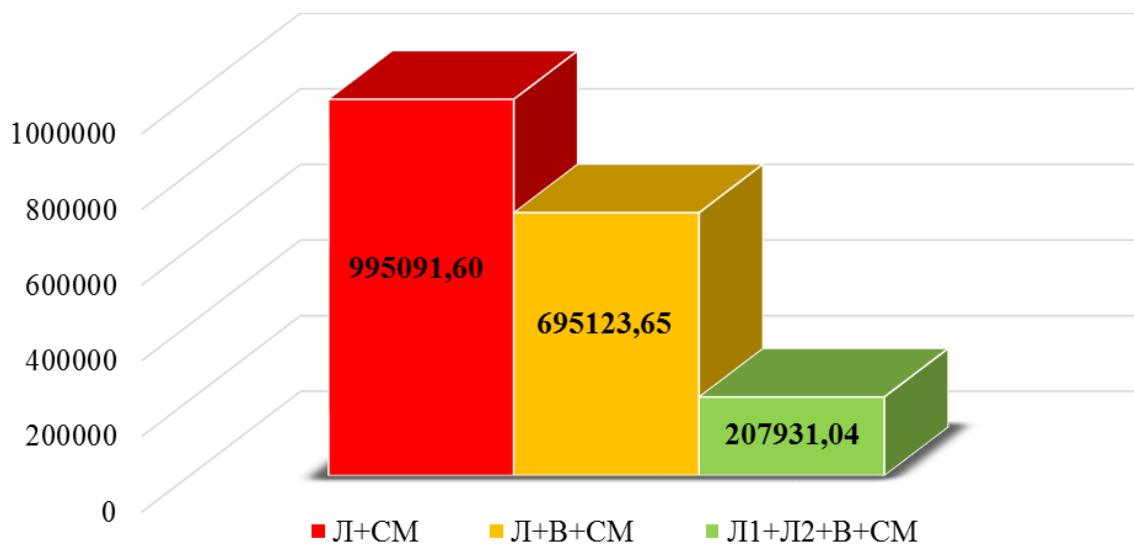


Рисунок 60 –График цен на расходы

Таким образом, расчеты показывают, что наиболее экономически выгодным вариантом для состава шихты являются данные, представленные на рисунке58, – на свежих материалах, возврате, ломе-1 и ломе-2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были изучены особенности использования синтеза сплавов, их перспективы, направления развития и основные предприятия России, занимающиеся целенаправленно синтезом жаропрочных сплавов. Было выяснено что основное предприятие, которое занимается синтезом жаропрочных сплавов является Всероссийский научно-исследовательский институт авиационной промышленности. Работы по созданию новых сплавов идут большими темпами. Новые задачи порождают новые сплавы.

Был произведен расчет литниково-питающей системы, а также, используя программу LWMFlowCV, проведены изменения, устраняющие дефекты в отливке, определен выход годного, и исходя из этого, произведен выбор плавильной печи. Также, определен метод изготовления формы, выбрана смесь для изготовления формы, плавильное оборудование и произведен расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава 40X24H12СЛ.

В ходе работы были изучены свойства жаропрочных сплавов, обладающих высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред. Были выбраны современные оборудования и технологии для изготовления отливок из сплава 40X24H12СЛ.

Прежде, чем получить удовлетворительный результат, было проведено 6 исследований, с учётом изменения следующих параметров: температура заливки, время заполнения формы, время кристаллизации, материал формы, начальная температура формы, материал стержня.

Таким образом, все выбранные параметры, характеристики и конфигурации позволили получить необходимый результат. Наблюдение за развитием процессов и четкое хронометрированные образования дефектов в программе LVMFlowCV дает возможность понять, когда и в какой области дефекты могут возникнуть, что в свою очередь, позволяет, непосредственно, в процессе разработки вносить изменения в конструкцию литниковой системы.

Завершающим этапом данной работы является расчет норм расхода шихтовых материалов, обеспечивающих необходимый химический состав и выход годного сплава 40X24H12СЛ.

Выполненная работа соответствует требованиям технического задания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. История жаропрочных сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://viam.ru/>
2. Коррозионностойкие стали и сплавы. Жаростойкие стали и сплавы. Жаропрочные стали и сплавы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/>
3. Структура и механические свойства при комнатных и высоких температурах (Н.С. Самойлов)/[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.naukaspb.ru/>
4. Большая энциклопедия нефти и газа / Сталь - перлитный класс/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>.
5. Большая энциклопедия нефти и газа / Сталь - мартенситного класс/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>
6. Большая энциклопедия нефти и газа / Сталь - мартенситно-ферритногокласс/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>
7. Большая энциклопедия нефти и газа / Сталь - аустенитного класс/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>
8. Энциклопедия по машиностроению XXL[Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://mash-xxl.info/>
9. Энциклопедия современной техники строительство / никелевые сплавы литейные жаропрочные / [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.bibliotekar.ru/>
10. Сплавы на железо-никелевой основе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.su/>
11. Жаропрочные деформируемые сплавы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://viam.ru/>
12. 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.
13. Е.Н. Каблов, Физико-химические и технологические особенности соединения жаропрочных сплавов, содержащих рений. ВИАМ / 2005-204296,27с.
14. ООО «Индуктотерм» - дочерняя компания InductothermCorp [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.ruscastings.ru>
15. Индукционные печи и миксеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.ruscastings.ru>

16. АЮ Коптева «Разработка технологии производства отливок из сплавов с высокой удельной прочностью на основе титана» Сибирский Федеральный Университет / Красноярск 2018, 76 с.
17. Катализатор для связующих систем, песчано-глинистые формы ,ООО «Полимет» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://stavrol.ru/>
18. AlpHaset процесс и его использование в России, Orkas J. 2001. Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilization. Helsinki University of Technology, Report ТКК-VAL-3/2001, Espoo, Finland, 148с.
19. Жаров А.В. «Исследование технологических свойств и разработка ХТС для ОАО Красный Октябрь», Санкт-Петербург 2016г., 93 с.
20. Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://metallicheskiy-portal.ru/>
21. Вирт, А. Э. Расчет литниковых систем стальных отливок: учеб. пособие / А. Э. Вирт, А. М. Лаврентьев. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 36 с.
22. Производственная программа 2007, OMEGAFOUNDRYMACHINERY, Omega Foundry Machinery Limited, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [web: www.ofml.net](http://web: www.ofml.net)
23. 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.
24. Вакуумно-пелёночная формовка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://novlitech.ru>.
25. Е.Н. Буданов, Инновационная технология СЕЙАТЦУ – процесс для модернизации литейного производства России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://http://otlivka.info.ru>

