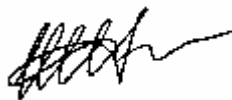


На правах рукописи



Шайхутдинова Евгения Флюровна

**СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ
СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2011

Работа выполнена на кафедре «Машины и технология литейного производства» ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РБ
Ганеев Альмир Амирович.

Официальные оппоненты: — доктор технических наук, профессор
Кулаков Борис Алексеевич,
ГОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(г. Челябинск);
— кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
Аверьянов Евгений Федорович,
Министерство промышленности и
природных ресурсов Челябинской
области (г. Челябинск);

Ведущая организация — ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина»

Защита диссертации состоится 25 мая 2011 г., в 12 часов,
в ауд. 201 (гл. корп.) на заседании диссертационного совета Д 212.298.06
при Южно-Уральском государственном университете (ГОУ ВПО ЮУрГУ),
г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим
направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, диссертационный совет Д 212.298.06. Тел/факс (351) 267-90-96.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО ЮУрГУ.

Автореферат разослан «___» апреля 2011 года.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.298.06



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из важнейших проблем стоматологии - производство высококачественных и недорогих зубных протезов на основе конструкционных материалов, из которых наиболее приемлемыми являются металлы и их сплавы.

На протяжении многих лет в ортодонтологии применяются золотые стоматологические сплавы (СС), т.к. это наиболее технологичный материал, не вызывающий отрицательных реакций организма. В то же время, в связи с высокой стоимостью благородных металлов, а также их недостаточной прочностью, твердостью и повышенной истираемостью, в настоящее время ведется интенсивный поиск СС, способных заменить золото и другие благородные металлы. В частности, значительные успехи были достигнуты при введении в ортопедическую стоматологию СС на основе никеля и кобальта, которые имеют хорошие физико-механические свойства. Однако сравнительный анализ показывает, что кобальтовые СС имеют высокую температуру плавления, большую усадку и низкую жидкотекучесть, что создает большие проблемы при литье тонкостенных конструкций. Кроме того, микроскопический анализ прочности соединения металла с керамикой СС на основе кобальта показывает, что соединение металла с керамикой имеет низкую прочность. Это связано с повышенной окисляемостью поверхностного слоя кобальтовых СС.

С учетом вышесказанного, литейные никелевые СС для изготовления протезов в ортопедической стоматологии наиболее перспективны. Они имеют ряд преимуществ, прежде всего это достаточная прочность, хорошая технологичность. У СС на основе никеля относительно низкая температура плавления, хорошая жидкотекучесть, и что немаловажно, хорошее сцепление с керамикой.

Однако повышающиеся требования к материалу и конструкции протезов не позволяют использовать устаревшие сплавы. На данный момент не существует никелевых сплавов, отвечающих полностью требованиям ортопедической стоматологии, поэтому необходимы новые сплавы.

Существующие методы разработки новых сплавов имеют ряд недостатков (большие временные и материальные затраты и др.). В связи с дороговизной некоторых необходимых легирующих элементов и в условиях рыночной экономики необходима разработка и применение более экономных методик разработки новых сплавов. Наряду с традиционными методами, необходимым инструментом становятся формальные методы синтеза сплавов.

Разработка и развитие формальных методов прогнозирования свойств СС, опирающихся на использование методов классического металловедения и математического моделирования, относятся к наиболее приоритетным и актуальным научно-техническим задачам. В связи с этим возникает необходимость в систематизации, обобщении и анализе многочисленных результатов исследований по проблеме синтеза СС и выработке новых подходов к прогнозированию свойств сплава.

Поэтому **целью данной работы** является разработка нового литейного никелевого СС на основе синтеза сплавов с применением системы автоматизированного проектирования, который бы минимизировал временные и материальные затраты.

Для этого были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка метода синтеза литейных никелевых СС с применением системы автоматизированного проектирования.
2. Разработка математической модели влияния легирующих элементов (ЛЭ) на наиболее значимое физико-механическое свойство (предел текучести) литейных никелевых СС и программная реализация алгоритмов расчета

с использованием метода искусственных нейронных сетей (ИНС).

3. Создание тематической базы данных (БД) по современным литейным никелевым СС и разработка метода восстановления недостающей информации в БД о свойствах литейных никелевых СС.

4. Разработка нового литейного никелевого СС и технологического процесса литья зубных протезов из данного сплава.

5. Экспериментальная оценка эффективности разработанной методики синтеза литейных никелевых СС на основе исследования физико-механических и литейных свойств разработанного сплава в зависимости от технологических параметров литья.

Методы исследований. Поставленные в работе задачи решались на основе методов физического металловедения, теории вероятностей и математической статистики, методов математического моделирования, автоматизированного проектирования.

Достоверность полученных результатов обосновывается:

1. Применением основных положений теории физического металловедения, теории вероятностей и математической статистики, методов математического моделирования, автоматизированного проектирования, теории биохимических процессов.

2. Обработкой результатов экспериментальных исследований структуры, свойств и оценки качества отливок из разработанного сплава, полученных на современном оборудовании, статистической обработкой результатов и сопоставлением их с данными теоретического анализа.

3. Сравнением полученных результатов с результатами аналогичных или близких постановок и решений отечественных и зарубежных авторов.

На защиту выносятся:

1. Метод синтеза литейных никелевых СС по данным пассивного эксперимента.

2. Математическая модель влияния ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС.

3. Результаты оценки эффективности разработанной методики синтеза сплавов путем сравнения физико-механических и литейных свойств разработанного сплава со свойствами серийного сплава «Медар-сервис».

4. Тематическая БД по современным литейным никелевым СС.

5. Метод повышения информативности БД.

Научная новизна научно-технических решений обусловлена тем, что в работе впервые:

1. разработана методика синтеза литейных никелевых СС, основанная на априорной информации о составах и свойствах известных СС;

2. разработана методика расчета математических моделей влияния состава СС на его предел текучести, с использованием автоматизированной системы синтеза сплавов, реализующей метод ИНС;

3. решена проблема наполнения БД по коэффициенту термического расширения (КТР) в диапазоне температур 20-600°C, что позволило провести сравнительный анализ литейных никелевых СС, полученных из разных источников;

4. рассчитаны математические модели влияния концентраций ЛЭ на предел текучести никелевых СС, с использованием метода ИНС;

5. разработана классификация легирующих элементов по их положению в периодической таблице Д.И. Менделеева с учетом их влияния на свойства литейный никелевых СС.

Практическая ценность работы:

1. разработана методика синтеза литейных никелевых СС, которая позволяет в 4...5 раз сократить сроки создания новых многокомпонентных СС, в 40...50 раз

снизить трудозатраты, в 10...20 раз сэкономить расход дорогостоящих материалов;

2. на основе разработанной методики рассчитан химический состав нового литейного никелевого СС, исследованы его физико-механические и литейные свойства, проведено их сравнение со свойствами серийного сплава «Медар-сервис»;

3. впервые создан банк данных с глубиной поиска 30 лет по 2009 год включительно по химическим составам и свойствам литейных никелевых СС. Разработана проблемно-ориентированная БД и осуществлена программная реализация информационно-поисковой системы (ИПС), применение которой является необходимой основой для разработки математической модели никелевых СС.

Новизна, значимость технических решений и приоритет разработок подтверждаются:

- свидетельством РосПатента №2004620060 об официальной регистрации базы данных «База данных по никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии»;

- свидетельством о государственной регистрации программы ЭВМ №2009612746 «Автоматизированное проектирование никелевых стоматологических сплавов»;

- патентом РФ №2277602 «Литейный сплав для стоматологии»;

- патентом РФ №2284363 «Сплав на никелевой основе для стоматологических изделий под керамику»;

- докладами и публикациями на международных и всероссийских научных конференциях и в межвузовских научных сборниках.

Практическая реализация работы.

1. С использованием разработанной методики синтеза сплавов определен состав и произведена плавка нового сплава «Нейростом», исследованы его физико-механические и литейные свойства.

2. Практические результаты исследований внедрены в учебный процесс ГОУ ВПО УГАТУ в виде практических занятий по дисциплине «Математическое моделирование и синтез сплавов» направления подготовки дипломированных специалистов 150200 – Машиностроительные технологии и оборудование по специальности 150204 – Машины и технология литейного производства.

Апробация работы. Основные результаты работы и отдельные ее разделы доложены и обсуждены на научных конференциях и семинарах, в том числе: Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» и «Туполевские чтения», Международном форуме «Актуальные проблемы современной науки», Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Проблемы современного энергомашиностроения», Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения», Всероссийской зимней школе аспирантов и молодых ученых с международным участием.

Также была произведена апробация разработанного сплава «Нейростом» в производственных условиях в литейном цехе ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» и в лабораторных условиях кафедры ортопедической стоматологии ГОУ ВПО «Башкирский государственный медицинский университет», результаты апробации подтверждены соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 37 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, 13 статей в тематических сборниках и сборниках трудов научно-технических конференций международного и российского значения, 15 тезисов докладов на международных и всероссийских

научно-технических конференциях, 1 свидетельство РосПатента об официальной регистрации базы данных, 1 свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ, 2 патента РФ и 4 учебно-методические разработки.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 125 наименований и 2 приложений; содержит 168 страниц текста основного содержания, 20 страниц приложения, 36 рисунка, 22 таблицы, 53 формул.

Личный вклад автора. В работе представлены научные и практические результаты, полученные автором в рамках разработанной А.А. Ганеевым комплексной методики синтеза жаропрочных никелевых сплавов и разработанной П.Н. Никифоровым методики синтеза жаропрочных никелевых сплавов для отливок методами физико-химического анализа и математического моделирования.

Диссертанту принадлежат: разработка методики синтеза литейных никелевых СС, постановка задач экспериментальных исследований и разработка основных методик, личное участие в проведении исследования в лабораторных условиях, внедрении результатов в учебный процесс.

В публикациях, выполненных в соавторстве, вклад диссертанта состоял в непосредственном участии в этих работах от постановки задачи и выполнения конкретных исследований до анализа полученных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

В первой главе проанализированы современные СС и предъявляемые к ним требования, на основании которых определены основные направления их развития. Было выяснено, что применяемые в ортопедической стоматологии на протяжении многих лет драгоценные СС, не имеют дальнейшей перспективы развития. В настоящее время наибольший интерес для ортодонтологии представляют СС на основе титана, никеля и кобальта, из которых наиболее оптимальным для изготовления неснимаемых стоматологических конструкций являются литейные никелевые СС. Эти сплавы сочетают в себе высокие физико-механические свойства и биологическую совместимость с хорошими литейными и технологическими характеристиками. Анализ СС на основе никеля показал, что в настоящее время не существует сплавов, отвечающих всем требованиям ортопедической стоматологии, поэтому необходимо создание нового СС на основе никеля.

Рассмотрены существующие методы синтеза сплавов. На основе проведенного анализа применимости методов синтеза сплавов для синтеза никелевых СС сформулированы цель и основные задачи ее решения. Определено научное направление решения проблемы синтеза никелевых сплавов, применяемых для изготовления литых зубных протезов.

Во второй главе проведен анализ методов математического моделирования, который показал, что методы регрессионного анализа, ИНС и методы группового учета аргументов (МГУА) могут применяться при решении задачи проектирования литейных никелевых СС. Однако специфика данной задачи проектирования делает затруднительным и мало эффективным применение традиционных методов регрессионного анализа. Интеллектуальные методы МГУА и ИНС, при осуществлении некоторых модификаций и адаптаций, позволяют строить математические модели, оптимальные по критерию краткосрочного прогноза значений физико-механических свойств для новых литейных никелевых СС. Переборный характер МГУА, а также сложная система

селекции полученных этим методом математических моделей не позволяет использовать данный метод в рамках исследования влияния химического состава на физико-механические свойства литейных никелевых СС. Таким образом, метод ИНС оптимально соответствует задаче проектирования литейных никелевых СС.

На основе проведенного в первой главе анализа применимости методов синтеза сплавов разработана общая методика синтеза литейных никелевых СС. Схема методики синтеза литейных никелевых СС представлена на рисунке 1.

Первый этап синтеза заключается в формулировании основных требований к литейным никелевым СС и формированию задания на сплав. Данный этап осуществлялся путем выполнения литературного обзора по существующим литейным никелевым СС и предъявляемым к ним требованиям.

На втором этапе синтеза литейных никелевых СС была создана реляционная БД по литейным никелевым сплавам, а затем ИПС к указанной БД, обеспечивающая сбор, хранение, актуализацию и обработку информации. При создании БД возникла необходимость повышения ее информативности, а именно пополнение БД по значениям КТР в том диапазоне, по которому отсутствует информация в первоисточниках.

На третьем этапе синтеза литейных никелевых СС возникла необходимость разработки новой четкой классификации по влиянию ЛЭ на свойства литейных никелевых СС. Для оценки оптимальных диапазонов концентраций ЛЭ необходимо провести анализ статистической информации, содержащейся в БД, с целью определения ЛЭ, которые оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства литейных никелевых СС, для их включения в математическое моделирование зависимости свойств от состава СС, и определение оптимальных диапазонов содержания этих ЛЭ, обеспечивающих максимальные эксплуатационные свойства.



Рисунок 1 - Схема методики синтеза литейных никелевых стоматологических сплавов

На четвертом этапе разрабатывается система автоматизированного синтеза литейных никелевых СС: выбирается топология и алгоритмы обучения ИНС; разрабатываются математические модели влияния ЛЭ на свойство литейных никелевых СС; оценивается их адекватность и выбирается лучшая по прогностическим возможностям математическая модель, по которой ведется поиск оптимального состава литейных никелевых СС.

На пятом этапе найденный оптимальный состав литейного никелевого СС выплавляется и его эксплуатационные свойства проверяются на соответствие ГОСТ и сравниваются с серийным сплавом, т.е. происходит апробация нового литейного никелевого СС.

Последним этапом является составление паспорта сплава и его патентование.

Кроме этого рассмотрены основные методики, применяемые в диссертационной работе: методика отливки образцов, методики исследования физико-механических свойств структуры нового литейного никелевого СС и серийного сплава «Медар-сервис».

В третьей главе описывается выбор системы управления БД и ее разработка, а также производится выбор основных ЛЭ литейных никелевых СС и определена их оптимальная концентрация.

В созданную тематическую БД по литейным никелевым СС вошли сведения о составах и свойствах, имеющиеся в отечественной и зарубежной литературе по данной тематике с глубиной поиска 30 лет по конец 2009 года включительно. БД содержит информацию по более чем 200 современным литейным никелевым СС, используемым для получения отливок. Общая схема базы данных по литейным никелевым СС представлена на рисунке 2.

На основе БД была разработана информационно-поисковая система (ИПС), которая предоставляет систематизированные сведения о литейных никелевых СС по основным физико-механическим, технологическим и эксплуатационным характеристикам. В рамках ИПС реализованы анализ и корректировка БД, патентная проработка сплавов, поиск данных по определенным критериям и др.

При составлении БД использованы сведения из отечественных и зарубежных источников, где значения КТР приводятся в диапазонах как 20-600°C, так и 25-500°C. При этом размеры выборок СС со значениями КТР_{20-600°C} значительно больше, чем с КТР_{25-500°C}. Однако эти данные не пересекаются, т.е. количество сплавов, для которых в БД имеются значения КТР и для диапазона 20-600°C, и для 25-500°C, очень мало. И наоборот, число СС, для которых известно только одно значение КТР, значительно больше.

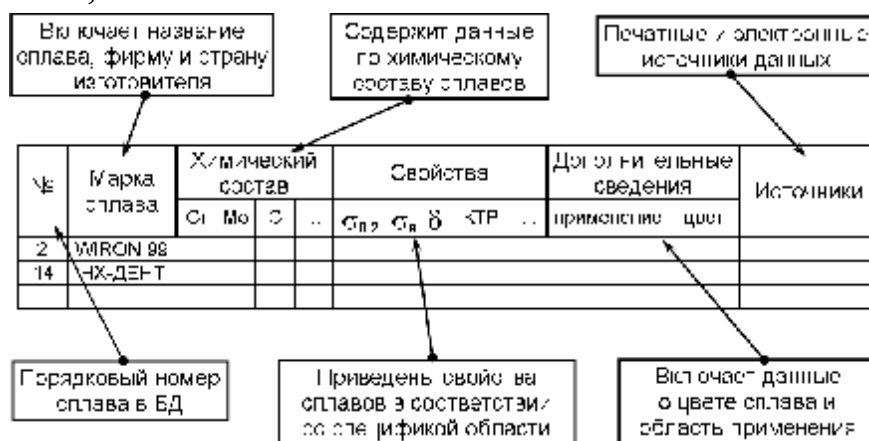


Рисунок 2 – Общая схема базы данных по никелевым стоматологическим сплавам

Поэтому возникла необходимость повышения информативности БД, т.е. пополнения БД значениями КТР в том диапазоне, по которому отсутствует информация в первоисточниках. Данная проблема была решена путем проработки теории физики металлов, согласно которой КТР металлов при температурах выше, чем температура Дебая, практически не зависит от температуры. Поскольку для большинства металлов $T_D < T_{комн}$, для сплавов этих металлов при комнатной температуре и выше КТР можем считать неизменным. Сопоставление КТР_{20-600°C} и КТР_{25-500°C} для сплавов, у которых в БД присутствуют оба показателя, показала, что различие не превышает показателя 2,1%.

Таким образом, стал возможен одновременный анализ современных литейных никелевых СС, полученных из разных первоисточников, КТР которых приведены в различных диапазонах температур, что увеличило объем выборок в 1,5-2 раза.

На основе анализа статистической информации, содержащейся в БД была разработана классификация ЛЭ по их влиянию на свойства литейных никелевых СС в зависимости от их положения в периодической системе Д.И. Менделеева, т.к. в литературных источниках не встречается четкой классификации ЛЭ по их влиянию на свойства литейных никелевых СС.

Были выделены 3 группы ЛЭ:

1. положительно влияющие на физико-механические свойства – элементы IIA-VIIA подгруппы, и некоторые элементы VIIIA и III-IVB подгруппы;
2. положительно влияющие на коррозионную стойкость и биосовместимость – элементы IIIA-VIIIA подгруппы и некоторые элементы IIA, IB-IVB подгруппы;
3. положительно влияющие на литейные свойства – элементы IIA-III A, IB подгруппы и некоторые элементы IVA, VA, VIIIA, IIB-VB подгруппы.

Проведен анализ статистической информации, содержащейся в БД, с целью определения ЛЭ, которые оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства литейных никелевых СС, для их включения в математическое моделирование зависимости свойств от состава СС, и определение оптимальных диапазонов содержания этих ЛЭ, обеспечивающих максимум свойств.

Оптимальной является такая концентрация ЛЭ в сплаве, которая обеспечивает максимум свойств литейных никелевых СС. С этой целью строили гистограммы распределения литейных никелевых СС в исходной выборке сплавов в БД. Количество интервалов гистограммы m определяется согласно формуле Стерджеса для объема выборки N :

$$m = 1 + \log_2 N, \quad (1)$$

а границы k -го интервала концентраций ЛЭ

$$c_{k \min} = c_{\min} + \frac{c_{\max} - c_{\min}}{m} (k - 1); c_{k \max} = c_{\min} + \frac{c_{\max} - c_{\min}}{m} k. \quad (2)$$

Основным классификационным признаком при построении гистограммы являются величины свойств литейных никелевых СС, а вспомогательным - количество СС в БД, принадлежащих соответствующему интервалу концентраций ЛЭ:

$$p_k = \frac{n_k}{N}, \quad (3)$$

где n_k – число литейных никелевых СС, концентрация ЛЭ в котором соответствует k -му интервалу.

В этом случае удельное число никелевых СС, соответствующих k -му интервалу концентраций ЛЭ (высота k -го столбца гистограммы) определяется по формуле:

$$h_k = \frac{p_k \bar{w}_k}{\sum_k p_k \bar{w}_k} = \frac{\sum_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\bar{w}_k$ - среднее значение свойств сплавов, принадлежащих к k -му интервалу, $k = 1, \dots, i$.

На основе проведенного анализа произведен выбор основных ЛЭ, определяющих свойства литейных никелевых СС: Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, Ta, V, C, PЗМ, Si, Mn, Fe. А также определены диапазоны концентраций, при которых литейные никелевые СС будут обладать комплексом максимальным свойств.

В четвертой главе разработана система автоматизированного проектирования литейных никелевых СС, с помощью которой была разработана математическая модель и осуществлен поиск оптимального состава литейного

никелевого СС.

С использованием метода ИНС и на основе анализа статистической информации о составах и свойствах литейных никелевых СС разработаны 24 математические модели, описывающие влияние концентраций основных ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС.

Была разработана методика селекции математических моделей, которая позволяет достоверно оценить адекватность и прогностические свойства модели. Методика основана на сравнении 4 показателей адекватности и прогнозировании математических моделей: параметр Бокса-Ветца, дисперсия адекватности, коэффициент детерминации и средняя относительная ошибка аппроксимации.

На основе разработанной методики селекции была выбрана наиболее адекватная математическая модель влияния концентрации ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Синдром}_{11} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} -0,197 \cdot x_{Cr} - 0,393 \cdot x_{Co} - 0,777 \cdot x_W + 0,800 \cdot x_{Mo} + 0,039 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,077 \cdot x_{Al} - 0,118 \cdot x_C - 0,133 \cdot x_{Ta} + 0,139 \cdot x_{Nb} + 0,999 \cdot x_{Si} + \\ + 0,081 \cdot x_{Mn} + 0,167 \cdot x_{Fe} - 0,342 \cdot x_{P3M} - 0,315 \cdot x_B + 0,329 \cdot x_{Грунна} - 0,026 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{12} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,132 \cdot x_{Cr} - 0,185 \cdot x_{Co} - 0,080 \cdot x_W + 0,272 \cdot x_{Mo} + 0,031 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,028 \cdot x_{Al} - 0,056 \cdot x_C + 0,015 \cdot x_{Ta} - 0,018 \cdot x_{Nb} + 0,056 \cdot x_{Si} + \\ + 0,094 \cdot x_{Mn} - 0,038 \cdot x_{Fe} - 0,106 \cdot x_{P3M} + 0,542 \cdot x_B + 0,027 \cdot x_{Грунна} + 0,056 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{13} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,870 \cdot x_{Cr} - 0,397 \cdot x_{Co} - 0,223 \cdot x_W + 0,999 \cdot x_{Mo} + 0,830 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,309 \cdot x_{Al} - 0,332 \cdot x_C - 0,196 \cdot x_{Ta} - 0,212 \cdot x_{Nb} - 0,247 \cdot x_{Si} + \\ + 0,007 \cdot x_{Mn} - 0,523 \cdot x_{Fe} - 0,147 \cdot x_{P3M} - 0,008 \cdot x_B + 0,073 \cdot x_{Грунна} + 0,091 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{21} = \text{Сигмоида}_2 (-0,371 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,999 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,708 \cdot \text{Синдром}_{13} + 0,130) \\ \text{Синдром}_{22} = \text{Сигмоида}_2 (-0,177 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,419 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,676 \cdot \text{Синдром}_{13} - 0,482) \\ \tilde{\sigma}_{0,2} = 0,999 \cdot \text{Синдром}_{21} - 0,917 \cdot \text{Синдром}_{22} - 0,738 \\ \sigma_{0,2} = \frac{903 \cdot \tilde{\sigma}_{0,2} + 1121}{2} \end{array} \right. \quad (5)$$

где Синдром - сигнал нейрона с предыдущего слоя на нейрон текущего слоя;

x – числовые данные подаваемые на вход ИНС (концентрация ЛЭ);

$\sigma_{0,2}$ - расчетное значение предела текучести;

$\tilde{\sigma}_{0,2}$ - кодированное расчетное значение предела текучести.

Для поиска состава литейных никелевых СС, обладающего максимальным пределом текучести, использовался метод сопряженных градиентов, так как данный метод учитывает не только направление градиента на текущем шаге, но и направление предыдущего. В качестве параметра оптимизации использовался отклик функции, представляющую собой математическую модель №11.

Алгоритм поиска максимального значения математической модели (см. рисунок 3):

Шаг 1. Принять x_0 за центр области определения модели (оптимальный диапазон концентраций).

Шаг 2. Вычислить градиент в точке x_0 - $\bar{p}_0 = \text{grad}_0 = f'(\bar{x}_0)$.

Шаг 3. Перейти в точку $\bar{x}_j = \bar{x}_{j-1} + \eta \bar{p}$ с заданным шагом η .

Шаг 4. Вычислить градиент $\text{grad}_{j+1} = f'(\bar{x}_{j+1})$.

Шаг 5. Вычислить коэффициент сопряжения $\beta_{j+1} = \frac{\text{grad}_{j+1}^T (\text{grad}_{j+1} - \text{grad}_j)}{\text{grad}_j^T \text{grad}_j}$.

Шаг 6. Вычислить новое сопряженное направление (длину вектора)
 $\bar{p}_{j+1} = \beta_{j+1} \bar{p}_j - \text{grad}_{j+1}$.

Шаг 7. Повторить шаги 3-6 до выполнения условия $f(x_j) < f(x_{j+1})$.

С использованием выбранной математической модели методом сопряженных градиентов по поверхности отклика определен состав литейного никелевого СС под условным названием «Нейростом» (см. таблицу 1), имеющего прогнозируемый предел текучести $\sigma_{0,2} = 941.144$ МПа.

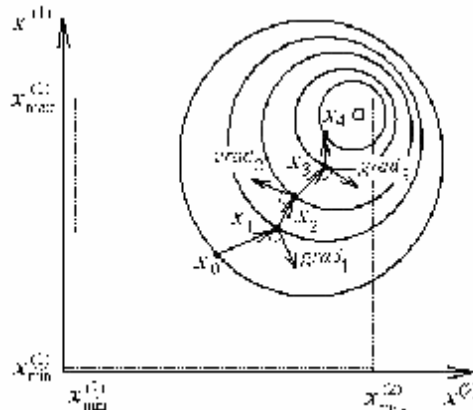


Рисунок 3 – Поиск максимального значения функции по поверхности отклика методом сопряженных градиентов

Таблица 1

Состав разработанного литейного никелевого СС «Нейростом», вес. %

Элемент	Ni	Cr	W	Mo	C	Ta	Si	Mn	P3M	B
Концентрация	65,881	25,090	1,480	4,000	0,113	0,685	0,143	1,116	0,472	0,020

На разработанную систему автоматизированного синтеза литейных никелевых СС получено свидетельство РосПатента о регистрации программы.

Пятая глава посвящена исследованию свойств разработанного сплава «Нейростом». Исследовались физико-механические, коррозионные и литейные показатели сплава и сравнивались с серийным сплавом «Медар-сервис».

Для изготовления заготовок сплава «Нейростом» применялись стандартные шихтовые материалы, используемые при производстве никельсодержащих сплавов. Выплавка заготовок производили в вакуумной индукционной печи УППФ-3М с электрокорундовым тиглем.

Шихтовые заготовки серийного сплава «Медар-сервис» закупались у производителя и представляли собой прутки диаметром 15мм и длиной 200 мм.

Каждая выплавка подвергалась спектральному анализу на оптико-эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx, чувствительность которого по большинству элементов составляет 0,001% (по некоторым до 0,0001%). Химический состав сплавов приведен в таблице 2 и таблице 3.

Для возможности сравнения свойств сплава «Нейростом» со свойствами сплава «Медар-сервис» были отлиты методом литья по выплавляемым моделям образцы для испытаний на физико-механические свойства (предел текучести с остаточной деформацией 0,2%, предел временного сопротивления, относительное удлинение, твердость по Виккерсу, КТР, коррозионная стойкость).

Испытания на статическое растяжение (разрыв) проводились по ГОСТ 1497-84 на испытательной машине Zwick-Roell Z100 при комнатной температуре. Результаты исследования временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения приведены на рисунке 4.

Испытания на твердость по Виккерсу проводились по ГОСТ 2999-75

на твердомере ТП при комнатной температуре. Результаты исследования твердости приведены на рисунке 5.

Таблица 2

Химический состав разработанного литейного никелевого стоматологического сплава «Нейростом» (никель основа), %

Элемент	Легирующие элементы									Примеси						
	Cr	Mo	W	C	Ta	Si	Mn	B	Ce	Nb	Fe	Al	Cu	Ca	S	P
Концентрация	25,39	4,09	1,486	0,113	0,704	0,144	1,127	0,020	0,473	0,054	0,050	0,049	0,01	0,0050	0,0050	0,0052

Таблица 3

Химический состав серийного литейного никелевого стоматологического сплава «Медар-сервис» (никель основа), %

Элемент	Легирующие элементы								Примеси							
	Cr	Mo	Nb	C	Mn	Si	Fe	B	Ce	W	Ta	Al	Cu	Ca	S	P
Концентрация	24,48	9,30	1,255	0,017	0,526	1,248	0,245	0,012	0,017	0,077	0,058	0,050	0,02	0,0050	0,0085	0,0088

Результаты исследования механических свойств сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» показали, что разработанный сплав имеет более высокие прочностные характеристики, чем серийный сплав, с относительно малым понижением пластичности (см. рисунок 4). Повышение прочностных свойств разработанного сплава «Нейростом» обосновывается тем, что в сплаве содержится вольфрам, который входит в состав γ -твердого раствора и γ' -фазы разработанного сплава и повышает его прочностные характеристики.

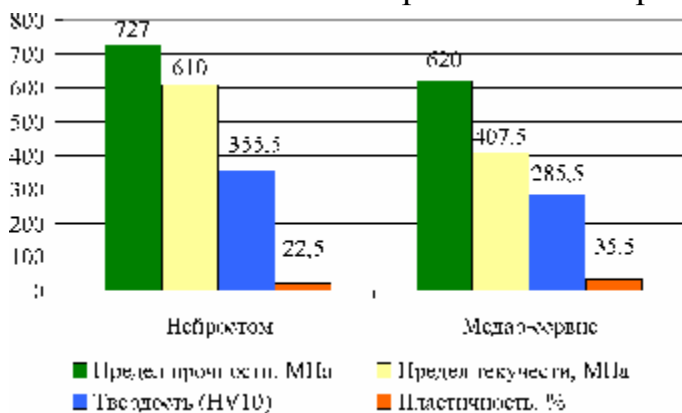


Рисунок 4 - Результаты механических испытаний образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис»

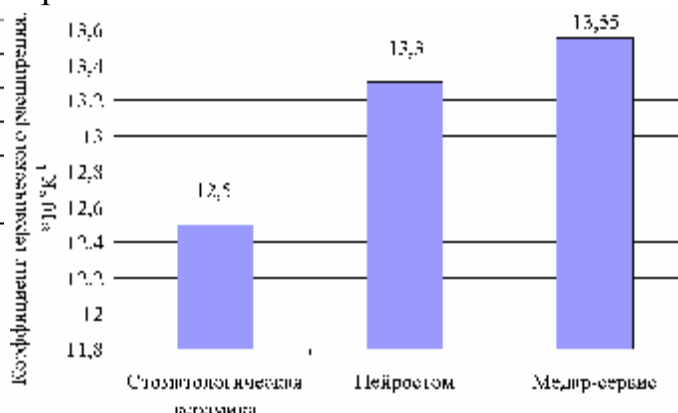


Рисунок 5 – Коэффициент термического расширения в диапазоне температур 20-600°C для сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» и керамической массы Duceram® PLUS

Кроме того, в состав разработанного сплава входит тантал, который является γ' -образующим элементом и стабилизирует выделение упрочняющей γ' -фазы в сплаве, что также повышает его прочностные свойства и твердость по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис».

Испытания на КТР проводились по ГОСТ 14080-78 с применением дилатометра марки Linseis L76 в интервале температур от 20°C до 600°C. Разброс свойств по КТР для сплава «Нейростом» составляет $13,21...13,40 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, против соответственно $13,51...13,60 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ для сплава «Медар-сервис».

Анализ результатов испытаний образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» на КТР в интервале температур 20-600°C (см. рисунок 5) показал, что разработанный сплав обладает несколько меньшим КТР, что обеспечивается снижением концентрации Мо.

Испытания на коррозионную стойкость проводились по ГОСТ Р 51767-2001 (Приложение А) с помощью фотоколориметра Hanna C-200. Разброс свойств

для сплава «Нейростом» по потере массы никеля составляет 1,26...1,28 мг/см², по потере массы хрома – 0,13...0,16 мг/см², по потере массы молибдена – 0,09...0,12 мг/см² и по суммарной потере массы – 1,48...1,57 мг/см², против свойств для сплава «Медар-сервис» соответственно 2,36...2,76 мг/см², 0,16...0,23 мг/см², 0,12...0,16 мг/см² и 2,64...3,15 мг/см².

Потеря массы сплава «Нейростом» ниже в 2 раза, чем сплава «Медар-сервис», что свидетельствует о высокой коррозионной стойкости разработанного сплава. Повышение коррозионной стойкости сплава «Нейростом» достигается путем повышения концентрации хрома, а также марганца и церия, которые, помимо устранения вредного влияния серы, повышают адгезию защитных окисных пленок.

Помимо, хрома, марганца и церия, повышение коррозионной стойкости разработанного сплава обосновывается тем, что сплав «Нейростом» в отличие от серийного сплава содержит бор, который снижает термодинамическую активность углерода и улучшают морфологию карбидов, снижающие стабильность γ -твердого раствора и инициирующие образование карбидов типа $Me_{23}C_6$ на границах зерен.

В отличие от «Медар-сервис», «Нейростом» имеет более высокую концентрацию церия, что способствует наиболее эффективному устранению вредного влияния S, что повышает биологическую совместимость с организмом человека.

Определение критических температур сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили по кривым охлаждения расплавленного металла в тигле плавильной печи. Результаты измерений приведены в таблице 4. Видно, что сплаву «Нейростом» соответствуют более низкие значения температур ликвидус и солидус, а также меньшая ширина интервала кристаллизации, чем у сплава «Медар-сервис».

Таблица 4

Параметры кристаллизации сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис»

Сплав	Критические температуры, °C		Интервал кристаллизации, °C
	T_L	T_S	
«Нейростом»	1358	1321	37
«Медар-сервис»	1351	1303	48

Сужение интервала кристаллизации разработанного сплава «Нейростом» происходит в основном за счет повышения температуры солидус. Это вызвано тем, что вольфрам в сплаве повышает термическую стабильность γ -твердого раствора, а также влиянием γ' -фазы Ni_3Ta , которая имеет высокую температуру кристаллизации в сплаве «Нейростом». Относительное малое повышение температуры ликвидус в этой системе объясняется тем, что в твердых растворах основное выделение теплоты кристаллизации происходит ближе к температуре ликвидус, что увеличивает время стояния ликвидуса.

Известно, что сужение интервала кристаллизации приводит к уменьшению разветвленности дендритов, понижает температуру нулевой жидкотекучести и улучшает жидкотекучесть. Поэтому затвердевание узкоинтервальных сплавов происходит за счет равномерного перемещения фронта раздела твердой и жидкой фазы, в отличие от широкоинтервальных сплавов, затвердевание которых происходит за счет увеличения зоны твердожидкого состояния.

Литейные свойства сплавов исследовали на двух пробах: комплексной пробе Купцова-Нехензи (см. рисунок 6) - для испытания нового сплава в производственных условиях, и специализированной пробе по ГОСТ Р 51767-2001 (см. рисунок 7) - для испытания нового сплава в условиях

изготовления единичной стоматологической отливки.

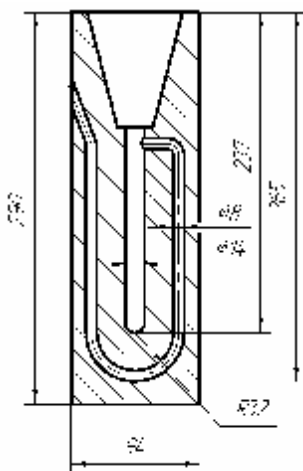


Рисунок 6 - Комплексная проба
Купцова-Нехензи

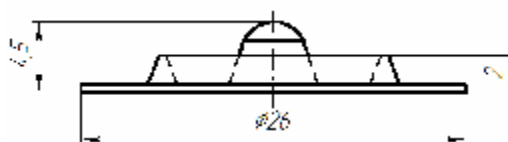


Рисунок 7 – Специализированная
проба по ГОСТ Р 51767-2001

Сравнительное исследование литейных свойств сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили на оболочковых формах-пробах, аналогичных по конфигурации малой комплексной пробе для испытания цветных металлов. Проба позволяет одновременно определить жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объем усадочных пороков. Оболочковые формы пробы изготавливали по выплавляемым моделям по методике изложенной в главе 2.

После остывания каналы пробы вскрывали и определяли жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объемы усадочных пороков.

Условно-истинную жидкотекучесть сплавов определяли по длине заполнения U-образного канала по шкале, нанесенной на стенках полуформ, по плоскости разреза. Объем данного канала составляет только 15% от объема конусной части пробы, поэтому сохраняется постоянство металлостатического напора при заполнении пробы при условии полного прекращения заливки. Результаты определения жидкотекучести приведены в таблице 5.

В комплексной пробе имелось 4 участка различной длины, где наблюдалось торможение усадки залитого сплава, дающие возможность судить о склонности сплава к образованию трещин. Проведенные исследования показывают, что все сплавы имеют на пробе трещины. Ширину трещин измеряли штангенциркулем по осевой линии канала между соответствующими точками бывшего соединения. Результаты измерения суммарной ширины трещин на всех участках торможения малой комплексной формы приведены в таблице 5.

Определение усадочных пороков производили на конусном образце сплава, получаемом в воронке пробы. Результаты исследования усадочных пороков приведены в таблице 5.

Линейную усадку сплавов определяли по усадке центрального прутка диаметром 15 мм в вертикальном канале формы. Верхняя часть этого прутка в месте ответвления U-образного канала получается жестко закрепленной, а нижняя может при усадке свободно перемещаться вверх. Внизу, между свободным концом прутка и кромкой канала, образуется усадочный зазор Δl , величина которого позволяет определить линейную усадку исследуемых сплавов. Измерение усадочного зазора производили штангенциркулем с точностью до 0,05 мм. Результаты исследования линейной усадки приведены в таблице 5.

Сравнительное исследование жидкотекучести также проводили на специализированной пробе согласно ГОСТ Р 51767-2001. Количественной мерой жидкотекучести по ГОСТ Р 51767-2001 служит высота кольца пробы

с трапециевидным сечением – параметр h . Данный показатель измерялся посредством оптической измерительной системы ATOS II XL, с помощью программного комплекса Geomagic Qualify. Таким образом, наибольшей жидкотекучестью обладали те сплавы, которые наиболее точно воспроизводили параметр h . Результаты исследования на жидкотекучесть приведены в таблице 5.

Таблица 5

Литейные свойства образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» на жидкотекучесть по комплексной пробе

	Нейростом	Медар-сервис
Жидкотекучесть по комплексной пробе, мм	376	369
Жидкотекучесть по специализированной пробе, мм	1,95	1,91
Сумма длин трещин, мм	2,66	3,11
Склонность к образованию усадочных пороков: - концентрированная усадочная раковина, %	1,54	1,69
- объем усадочных пор, %	2,79	2,86
Линейная усадка, %	2,13	2,17

Результаты испытания показали, что литейные свойства разработанного сплава «Нейростом» находятся на уровне свойств серийного сплава «Медар-сервис».

Однако некоторое повышение показателей жидкотекучести разработанного сплава «Нейростом» по сравнению с серийным достигается путем введения в сплав тантала.

Введение в разработанный сплав церия и снижение концентрации кремния, позволяет несколько снизить показатель литейной усадки.

Согласно таблице 5 сплав «Нейростом» обладает большей трещиноустойчивостью, чем сплав «Медар-сервис». Это можно объяснить тем, что сплав «Нейростом» имеет достаточную пластичность при высоких прочностных показателях (см. таблицу 4) и меньшую величину литейной усадки (см. таблицу 5), чем сплав «Медар-сервис».

Некоторое понижение склонности к образованию усадочных пороков сплава «Нейростом» (см. таблицу 5) можно объяснить уменьшением разветвленности дендритов (см. рисунок 8) за счет сужения интервала кристаллизации, что способствует улучшению питания микрообъемов отливок и уменьшает склонность к усадочной пористости.

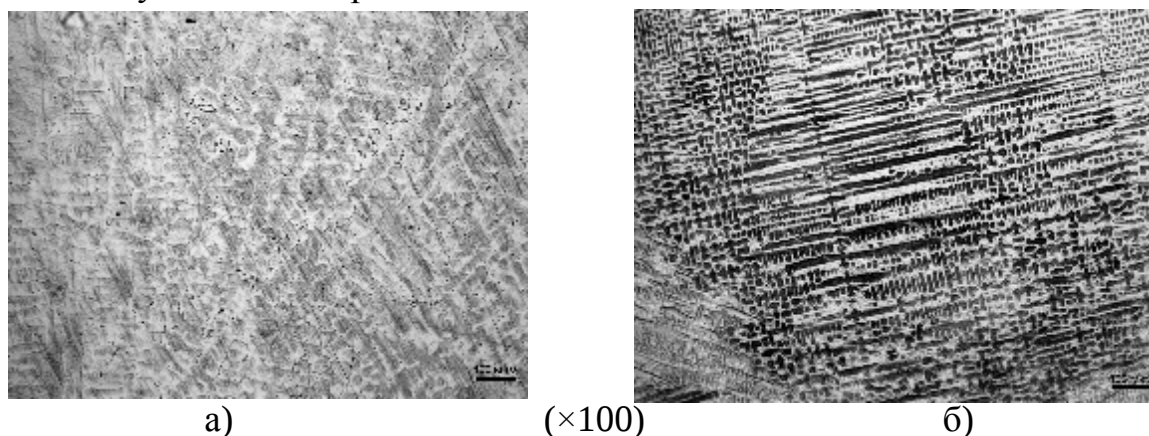


Рисунок 8 – Микроструктура сплавов «Нейростом» (а) и «Медар-сервис»(б)

Для исследования структуры сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» были изготовлены микрошлифы, выполненные в поперечном сечении образцов.

Исследование микроструктуры показали, что сплав «Нейростом» имеет

более равномерную и упорядоченную структуру по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис». В структуре разработанного сплава отсутствуют заметные выделения карбидных фаз, способных стать концентраторами напряжений (см. рисунок 5), что делает сплав «Нейростом» более пластичным и менее склонным к преждевременному разрушению.

В микроструктуре сплава «Нейростом» крупных избыточных фаз не наблюдается, а сплав «Медар-сервис» имеет ярко выраженное дендритное строение с типичным для такой структуры неоднородным распределением ЛЭ.

Исследования микроструктуры показали, что при одинаковых параметрах технологического процесса литья сплав «Нейростом» имеет более совершенное дендритное строение, чем серийный сплав «Медар-сервис», что способствует повышению пластичности и снижению склонности к преждевременному разрушению. Это можно объяснить введением в сплав «Нейростом» элементов повышающих стабильность γ -твердого раствора и устраняющих вредное влияние примесей, а также меньшей шириной интервала кристаллизации.

Сплав «Нейростом», при плавке как в промышленных, так и в стоматологических печах, показал себя технологичнее серийного «Медар-сервис». С футеровкой и формой из электрокорунда и из стоматологической паковочной массы взаимодействия сплава «Нейростом» не наблюдается.

Исходя из данных по температуре плавления сплава «Нейростом» его рекомендуемая температура заливки должна составлять 1410...1440°C. Наблюдения показали, при данной температуре разработанный сплав оптимально заполняет все полости формы.

На основании результатов исследования можно рекомендовать СС «Нейростом» к серийному производству для изготовления неснимаемых зубных протезов.

В приложениях приведены:

1. БД «База данных по литейным никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии».
2. Рисунки из главы 3.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана новая методика автоматизированного синтеза литейных никелевых СС, основанная на априорной информации о составах и свойствах известных СС, которая позволяет в 4...5 раз сократить сроки создания новых многокомпонентных СС, в 40...50 раз снизить трудозатраты, в 10...20 раз сэкономить расход дорогостоящих материалов.
2. Разработана математическая модель влияния ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС с помощью созданной программы, реализующей методику автоматизированного проектирования сплавов с использованием метода ИНС.
3. С помощью математического моделирования разработан новый многокомпонентный литейный СС на никелевой основе «Нейростом» и технологический процесс литья зубных протезов из разработанного сплава, на который получен патент РФ №2284363.
4. Впервые создана тематическая БД по литейным никелевым СС, применяемых для изготовления коронок, мостов и неснимаемых протезов. На основе БД была разработана ИПС, которая предоставляет систематизированные сведения о литейных никелевых СС по основным физико-механическим, технологическим и эксплуатационным характеристикам. Получено свидетельство РосПатента №2004620060 об официальной регистрации разработанной БД.
5. Была решена проблема наполнения БД по КТР, что позволило провести

сравнительный анализ современных литейных никелевых СС, полученных из разных первоисточников, КТР которых приведены в различных диапазонах температур. В результате необходимый для математического моделирования объем выборок увеличился в 1,5-2 раза.

6. Определены оптимальные области содержания ЛЭ в литейных никелевых СС методом построения гистограмм распределения литейных никелевых СС в зависимости от их свойств.

7. В производственных и лабораторных условиях были произведены плавки СС «Нейростом», исследованы его физико-механические и литейные свойства. Данные, полученные в результате анализа проведенных исследований, показали, что сплав «Нейростом» обладает более высокими физико-механическими и литейными свойствами по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Ганеев, А.А. Классификация элементов периодической системы Д.И. Менделеева по их влиянию на служебные свойства никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Никифоров П.Н. // Литейщик России. – 2009. – №12. – С.32-34.
2. Ганеев, А.А. Методика аналитического синтеза стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Федорова Н.А. // Ползуновский вестник. – 2005. - № 2. – С. 85-88.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Ганеев, А.А. Современные сплавы, применяемые в бюгельном протезировании / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Авиационно-технологические системы: Межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2004. – С. 115-121.
2. Ганеев, А.А. Информационное обеспечение методики компьютерного проектирования никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Вестник Алтайского государственного технического университета. - 2005. - №3-4. – С. 136-139.
3. Ганеев, А.А. Компьютерный синтез никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш. // Труды 2-го Международного форума «Актуальные проблемы современной науки». Медицинские науки. Часть 28. Секция: СТОМАТОЛОГИЯ. – Самара. 2006. – С. 81-85.
4. Ганеев, А.А. Методика компьютерного синтеза никелевых сплавов, применяемых для изготовления неснимаемых зубных протезов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Ползуновский альманах – 2006. - №3. – С. 110-113.
5. Ганеев, А.А. Современные проблемы компьютерного проектирования никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию со дня рождения чл.-кор. РАН, профессора Р.Р. Мавлютова: сб. трудов. Т.5. – Уфа: УГАТУ, 2006. – С. 29-34.
6. Ганеев, А.А. Нейросетевые подходы к проектированию новых никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 189-191.
7. Шайхутдинова, Е.Ф. Синтез новых никелевых стоматологических сплавов с использованием нейросетевых методов // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, приборостроение, экономика и гуманитарные науки // Сборник трудов четвертой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 19-21 февраля 2009 г. – Уфа: Изд-во «Диалог», 2009. – С. 397-401.

8. Шайхутдинова, Е.Ф. Выбор легирующего ряда для никелевых стоматологических сплавов / Шайхутдинова Е.Ф., Ганеев А.А., Деменок О.Б. // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. А.М.Гурьева и В.А. Маркова. – Вып. 5. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 110-114.
9. Ганеев, А.А. Исследование эксплуатационных свойств разработанного никелевого стоматологического сплава / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Литейные процессы: Межрегиональный сборник научных трудов. - Вып. 9. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. - С. 19-26.
10. Шайхутдинова, Е.Ф. Разработка математической модели влияния химического состава на свойства никелевых стоматологических сплавов с помощью метода искусственных нейронных сетей // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / УГАТУ – Уфа: УГАТУ, 2010. – с.145-147.
11. Шайхутдинова, Е.Ф. Автоматизированное проектирование никелевых сплавов, применяемых для изготовления литых зубопротезных заготовок / Шайхутдинова Е.Ф., Ганеев А.А. // Ползуновский альманах – 2010. - №1. – С. 14-18.
12. Никифоров, П.Н. Процессы формирования отливки: Лабораторный практикум по дисциплине «Теория формирования отливки» / Шайхутдинова Е.Ф. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 24 с.
13. Никифоров, П.Н. Заливка и кристаллизация расплава в форме: Лабораторный практикум по дисциплине «Основы затвердевания отливки» / Шайхутдинова Е.Ф. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 24 с.
14. Шайхутдинова, Е.Ф. Математическое моделирование и синтез сплавов [Электронный ресурс]: практикум / Ганеев А.А., Смирнов В.В., Никифоров П.Н. - ГОУ ВПО УГАТУ. - Учебное электронное издание. - Уфа: УГАТУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см (рег. свид. № 19527 от 30.06.2010).
15. Свидетельство РосПатента №20044620060 об официальной регистрации базы данных. База данных по никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш. Дата регистрации 26.02.2004.
16. Пат.2277602 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С19/05, А61К6/04. Литейный сплав для стоматологии / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. - №2005110491; заявл. 11.04.05; опубл. 10.06.06. – 4 с.
17. Пат.2284363 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С19/05, А61К6/04. Сплав на никелевой основе для стоматологических изделий под керамику / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Шевлякова Э.А.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. - №2005112112; заявл. 22.04.05; опубл. 27.09.06. – 4 с.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009612746. Автоматизированное проектирование никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Дата регистрации 28.05.2009.

Шайхутдинова Евгения Флюровна

СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2011. Формат 60 x 84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.- изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 128

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа – центр, ул. К.Маркса, 12

На правах рукописи



Шайхутдинова Евгения Флюровна

**СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ
СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2011

Работа выполнена на кафедре «Машины и технология литейного производства» ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РБ
Ганеев Альмир Амирович.

Официальные оппоненты: — доктор технических наук, профессор
Кулаков Борис Алексеевич,
ГОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет»
(г. Челябинск);
— кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
Аверьянов Евгений Федорович,
Министерство промышленности и
природных ресурсов Челябинской
области (г. Челябинск);

Ведущая организация — ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина»

Защита диссертации состоится 25 мая 2011 г., в 12 часов,
в ауд. 201 (гл. корп.) на заседании диссертационного совета Д 212.298.06
при Южно-Уральском государственном университете (ГОУ ВПО ЮУрГУ),
г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим
направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, диссертационный совет Д 212.298.06. Тел/факс (351) 267-90-96.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО ЮУрГУ.

Автореферат разослан «___» апреля 2011 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.298.06



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из важнейших проблем стоматологии - производство высококачественных и недорогих зубных протезов на основе конструкционных материалов, из которых наиболее приемлемыми являются металлы и их сплавы.

На протяжении многих лет в ортодонтологии применяются золотые стоматологические сплавы (СС), т.к. это наиболее технологичный материал, не вызывающий отрицательных реакций организма. В то же время, в связи с высокой стоимостью благородных металлов, а также их недостаточной прочностью, твердостью и повышенной истираемостью, в настоящее время ведется интенсивный поиск СС, способных заменить золото и другие благородные металлы. В частности, значительные успехи были достигнуты при введении в ортопедическую стоматологию СС на основе никеля и кобальта, которые имеют хорошие физико-механические свойства. Однако сравнительный анализ показывает, что кобальтовые СС имеют высокую температуру плавления, большую усадку и низкую жидкотекучесть, что создает большие проблемы при литье тонкостенных конструкций. Кроме того, микроскопический анализ прочности соединения металла с керамикой СС на основе кобальта показывает, что соединение металла с керамикой имеет низкую прочность. Это связано с повышенной окисляемостью поверхностного слоя кобальтовых СС.

С учетом вышесказанного, литейные никелевые СС для изготовления протезов в ортопедической стоматологии наиболее перспективны. Они имеют ряд преимуществ, прежде всего это достаточная прочность, хорошая технологичность. У СС на основе никеля относительно низкая температура плавления, хорошая жидкотекучесть, и что немаловажно, хорошее сцепление с керамикой.

Однако повышающиеся требования к материалу и конструкции протезов не позволяют использовать устаревшие сплавы. На данный момент не существует никелевых сплавов, отвечающих полностью требованиям ортопедической стоматологии, поэтому необходимы новые сплавы.

Существующие методы разработки новых сплавов имеют ряд недостатков (большие временные и материальные затраты и др.). В связи с дороговизной некоторых необходимых легирующих элементов и в условиях рыночной экономики необходима разработка и применение более экономных методик разработки новых сплавов. Наряду с традиционными методами, необходимым инструментом становятся формальные методы синтеза сплавов.

Разработка и развитие формальных методов прогнозирования свойств СС, опирающихся на использование методов классического металловедения и математического моделирования, относятся к наиболее приоритетным и актуальным научно-техническим задачам. В связи с этим возникает необходимость в систематизации, обобщении и анализе многочисленных результатов исследований по проблеме синтеза СС и выработке новых подходов к прогнозированию свойств сплава.

Поэтому **целью данной работы** является разработка нового литейного никелевого СС на основе синтеза сплавов с применением системы автоматизированного проектирования, который бы минимизировал временные и материальные затраты.

Для этого были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка метода синтеза литейных никелевых СС с применением системы автоматизированного проектирования.
2. Разработка математической модели влияния легирующих элементов (ЛЭ) на наиболее значимое физико-механическое свойство (предел текучести) литейных никелевых СС и программная реализация алгоритмов расчета

с использованием метода искусственных нейронных сетей (ИНС).

3. Создание тематической базы данных (БД) по современным литейным никелевым СС и разработка метода восстановления недостающей информации в БД о свойствах литейных никелевых СС.

4. Разработка нового литейного никелевого СС и технологического процесса литья зубных протезов из данного сплава.

5. Экспериментальная оценка эффективности разработанной методики синтеза литейных никелевых СС на основе исследования физико-механических и литейных свойств разработанного сплава в зависимости от технологических параметров литья.

Методы исследований. Поставленные в работе задачи решались на основе методов физического металловедения, теории вероятностей и математической статистики, методов математического моделирования, автоматизированного проектирования.

Достоверность полученных результатов обосновывается:

1. Применением основных положений теории физического металловедения, теории вероятностей и математической статистики, методов математического моделирования, автоматизированного проектирования, теории биохимических процессов.

2. Обработкой результатов экспериментальных исследований структуры, свойств и оценки качества отливок из разработанного сплава, полученных на современном оборудовании, статистической обработкой результатов и сопоставлением их с данными теоретического анализа.

3. Сравнением полученных результатов с результатами аналогичных или близких постановок и решений отечественных и зарубежных авторов.

На защиту выносятся:

1. Метод синтеза литейных никелевых СС по данным пассивного эксперимента.

2. Математическая модель влияния ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС.

3. Результаты оценки эффективности разработанной методики синтеза сплавов путем сравнения физико-механических и литейных свойств разработанного сплава со свойствами серийного сплава «Медар-сервис».

4. Тематическая БД по современным литейным никелевым СС.

5. Метод повышения информативности БД.

Научная новизна научно-технических решений обусловлена тем, что в работе впервые:

1. разработана методика синтеза литейных никелевых СС, основанная на априорной информации о составах и свойствах известных СС;

2. разработана методика расчета математических моделей влияния состава СС на его предел текучести, с использованием автоматизированной системы синтеза сплавов, реализующей метод ИНС;

3. решена проблема наполнения БД по коэффициенту термического расширения (КТР) в диапазоне температур 20-600°C, что позволило провести сравнительный анализ литейных никелевых СС, полученных из разных источников;

4. рассчитаны математические модели влияния концентраций ЛЭ на предел текучести никелевых СС, с использованием метода ИНС;

5. разработана классификация легирующих элементов по их положению в периодической таблице Д.И. Менделеева с учетом их влияния на свойства литейный никелевых СС.

Практическая ценность работы:

1. разработана методика синтеза литейных никелевых СС, которая позволяет в 4...5 раз сократить сроки создания новых многокомпонентных СС, в 40...50 раз

снизить трудозатраты, в 10...20 раз сэкономить расход дорогостоящих материалов;

2. на основе разработанной методики рассчитан химический состав нового литейного никелевого СС, исследованы его физико-механические и литейные свойства, проведено их сравнение со свойствами серийного сплава «Медар-сервис»;

3. впервые создан банк данных с глубиной поиска 30 лет по 2009 год включительно по химическим составам и свойствам литейных никелевых СС. Разработана проблемно-ориентированная БД и осуществлена программная реализация информационно-поисковой системы (ИПС), применение которой является необходимой основой для разработки математической модели никелевых СС.

Новизна, значимость технических решений и приоритет разработок подтверждаются:

- свидетельством РосПатента №2004620060 об официальной регистрации базы данных «База данных по никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии»;

- свидетельством о государственной регистрации программы ЭВМ №2009612746 «Автоматизированное проектирование никелевых стоматологических сплавов»;

- патентом РФ №2277602 «Литейный сплав для стоматологии»;

- патентом РФ №2284363 «Сплав на никелевой основе для стоматологических изделий под керамику»;

- докладами и публикациями на международных и всероссийских научных конференциях и в межвузовских научных сборниках.

Практическая реализация работы.

1. С использованием разработанной методики синтеза сплавов определен состав и произведена плавка нового сплава «Нейростом», исследованы его физико-механические и литейные свойства.

2. Практические результаты исследований внедрены в учебный процесс ГОУ ВПО УГАТУ в виде практических занятий по дисциплине «Математическое моделирование и синтез сплавов» направления подготовки дипломированных специалистов 150200 – Машиностроительные технологии и оборудование по специальности 150204 – Машины и технология литейного производства.

Апробация работы. Основные результаты работы и отдельные ее разделы доложены и обсуждены на научных конференциях и семинарах, в том числе: Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» и «Туполевские чтения», Международном форуме «Актуальные проблемы современной науки», Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Проблемы современного энергомашиностроения», Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения», Всероссийской зимней школе аспирантов и молодых ученых с международным участием.

Также была произведена апробация разработанного сплава «Нейростом» в производственных условиях в литейном цехе ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» и в лабораторных условиях кафедры ортопедической стоматологии ГОУ ВПО «Башкирский государственный медицинский университет», результаты апробации подтверждены соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 37 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, 13 статей в тематических сборниках и сборниках трудов научно-технических конференций международного и российского значения, 15 тезисов докладов на международных и всероссийских

научно-технических конференциях, 1 свидетельство РосПатента об официальной регистрации базы данных, 1 свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ, 2 патента РФ и 4 учебно-методические разработки.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 125 наименований и 2 приложений; содержит 168 страниц текста основного содержания, 20 страниц приложения, 36 рисунка, 22 таблицы, 53 формул.

Личный вклад автора. В работе представлены научные и практические результаты, полученные автором в рамках разработанной А.А. Ганеевым комплексной методики синтеза жаропрочных никелевых сплавов и разработанной П.Н. Никифоровым методики синтеза жаропрочных никелевых сплавов для отливок методами физико-химического анализа и математического моделирования.

Диссертанту принадлежат: разработка методики синтеза литейных никелевых СС, постановка задач экспериментальных исследований и разработка основных методик, личное участие в проведении исследования в лабораторных условиях, внедрении результатов в учебный процесс.

В публикациях, выполненных в соавторстве, вклад диссертанта состоял в непосредственном участии в этих работах от постановки задачи и выполнения конкретных исследований до анализа полученных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и приведена общая характеристика работы.

В первой главе проанализированы современные СС и предъявляемые к ним требования, на основании которых определены основные направления их развития. Было выяснено, что применяемые в ортопедической стоматологии на протяжении многих лет драгоценные СС, не имеют дальнейшей перспективы развития. В настоящее время наибольший интерес для ортодонтологии представляют СС на основе титана, никеля и кобальта, из которых наиболее оптимальным для изготовления неснимаемых стоматологических конструкций являются литейные никелевые СС. Эти сплавы сочетают в себе высокие физико-механические свойства и биологическую совместимость с хорошими литейными и технологическими характеристиками. Анализ СС на основе никеля показал, что в настоящее время не существует сплавов, отвечающих всем требованиям ортопедической стоматологии, поэтому необходимо создание нового СС на основе никеля.

Рассмотрены существующие методы синтеза сплавов. На основе проведенного анализа применимости методов синтеза сплавов для синтеза никелевых СС сформулированы цель и основные задачи ее решения. Определено научное направление решения проблемы синтеза никелевых сплавов, применяемых для изготовления литых зубных протезов.

Во второй главе проведен анализ методов математического моделирования, который показал, что методы регрессионного анализа, ИНС и методы группового учета аргументов (МГУА) могут применяться при решении задачи проектирования литейных никелевых СС. Однако специфика данной задачи проектирования делает затруднительным и мало эффективным применение традиционных методов регрессионного анализа. Интеллектуальные методы МГУА и ИНС, при осуществлении некоторых модификаций и адаптаций, позволяют строить математические модели, оптимальные по критерию краткосрочного прогноза значений физико-механических свойств для новых литейных никелевых СС. Переборный характер МГУА, а также сложная система

селекции полученных этим методом математических моделей не позволяет использовать данный метод в рамках исследования влияния химического состава на физико-механические свойства литейных никелевых СС. Таким образом, метод ИНС оптимально соответствует задаче проектирования литейных никелевых СС.

На основе проведенного в первой главе анализа применимости методов синтеза сплавов разработана общая методика синтеза литейных никелевых СС. Схема методики синтеза литейных никелевых СС представлена на рисунке 1.

Первый этап синтеза заключается в формулировании основных требований к литейным никелевым СС и формирование задания на сплав. Данный этап осуществлялся путем выполнения литературного обзора по существующим литейным никелевым СС и предъявляемым к ним требованиям.

На втором этапе синтеза литейных никелевых СС была создана реляционная БД по литейным никелевым сплавам, а затем ИПС к указанной БД, обеспечивающая сбор, хранение, актуализацию и обработку информации. При создании БД возникла необходимость повышения ее информативности, а именно пополнение БД по значениям КТР в том диапазоне, по которому отсутствует информация в первоисточниках.

На третьем этапе синтеза литейных никелевых СС возникла необходимость разработки новой четкой классификации по влиянию ЛЭ на свойства литейных никелевых СС. Для оценки оптимальных диапазонов концентраций ЛЭ необходимо провести анализ статистической информации, содержащейся в БД, с целью определения ЛЭ, которые оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства литейных никелевых СС, для их включения в математическое моделирование зависимости свойств от состава СС, и определение оптимальных диапазонов содержания этих ЛЭ, обеспечивающих максимальные эксплуатационные свойства.



Рисунок 1 - Схема методики синтеза литейных никелевых стоматологических сплавов

На четвертом этапе разрабатывается система автоматизированного синтеза литейных никелевых СС: выбирается топология и алгоритмы обучения ИНС; разрабатываются математические модели влияния ЛЭ на свойства литейных никелевых СС; оценивается их адекватность и выбирается лучшая по прогностическим возможностям математическая модель, по которой ведется поиск оптимального состава литейных никелевых СС.

На пятом этапе найденный оптимальный состав литейного никелевого СС выплавляется и его эксплуатационные свойства проверяются на соответствие ГОСТ и сравниваются с серийным сплавом, т.е. происходит апробация нового литейного никелевого СС.

Последним этапом является составление паспорта сплава и его патентование.

Кроме этого рассмотрены основные методики, применяемые в диссертационной работе: методика отливки образцов, методики исследования физико-механических свойств структуры нового литейного никелевого СС и серийного сплава «Медар-сервис».

В третьей главе описывается выбор системы управления БД и ее разработка, а также производится выбор основных ЛЭ литейных никелевых СС и определена их оптимальная концентрация.

В созданную тематическую БД по литейным никелевым СС вошли сведения о составах и свойствах, имеющиеся в отечественной и зарубежной литературе по данной тематике с глубиной поиска 30 лет по конец 2009 года включительно. БД содержит информацию по более чем 200 современным литейным никелевым СС, используемым для получения отливок. Общая схема базы данных по литейным никелевым СС представлена на рисунке 2.

На основе БД была разработана информационно-поисковая система (ИПС), которая предоставляет систематизированные сведения о литейных никелевых СС по основным физико-механическим, технологическим и эксплуатационным характеристикам. В рамках ИПС реализованы анализ и корректировка БД, патентная проработка сплавов, поиск данных по определенным критериям и др.

При составлении БД использованы сведения из отечественных и зарубежных источников, где значения КТР приводятся в диапазонах как 20-600°C, так и 25-500°C. При этом размеры выборок СС со значениями КТР_{20-600°C} значительно больше, чем с КТР_{25-500°C}. Однако эти данные не пересекаются, т.е. количество сплавов, для которых в БД имеются значения КТР и для диапазона 20-600°C, и для 25-500°C, очень мало. И наоборот, число СС, для которых известно только одно значение КТР, значительно больше.

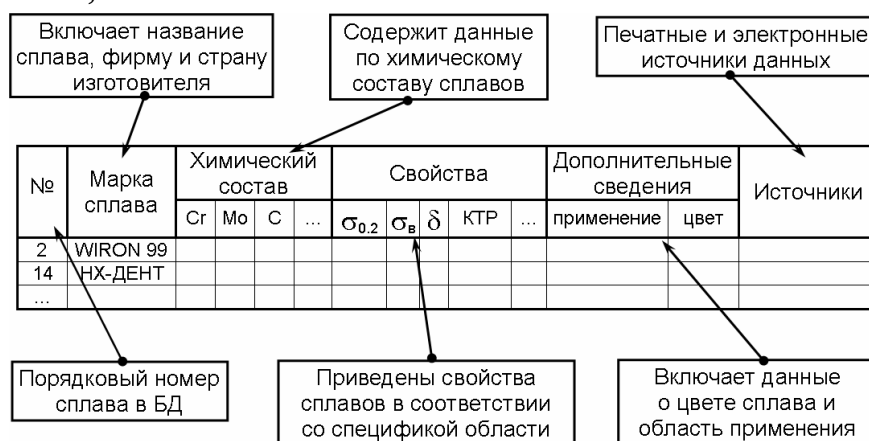


Рисунок 2 – Общая схема базы данных по никелевым стоматологическим сплавам

Поэтому возникла необходимость повышения информативности БД, т.е. пополнения БД значениями КТР в том диапазоне, по которому отсутствует информация в первоисточниках. Данная проблема была решена путем проработки теории физики металлов, согласно которой КТР металлов при температурах выше, чем температура Дебая, практически не зависит от температуры. Поскольку для большинства металлов $T_D < T_{комн}$, для сплавов этих металлов при комнатной температуре и выше КТР можем считать неизменным. Сопоставление КТР_{20-600°C} и КТР_{25-500°C} для сплавов, у которых в БД присутствуют оба показателя, показала, что различие не превышает показателя 2,1%.

Таким образом, стал возможен одновременный анализ современных литейных никелевых СС, полученных из разных первоисточников, КТР которых приведены в различных диапазонах температур, что увеличило объем выборок в 1,5-2 раза.

На основе анализа статистической информации, содержащейся в БД была разработана классификация ЛЭ по их влиянию на свойства литейных никелевых СС в зависимости от их положения в периодической системе Д.И. Менделеева, т.к. в литературных источниках не встречается четкой классификации ЛЭ по их влиянию на свойства литейных никелевых СС.

Были выделены 3 группы ЛЭ:

1. положительно влияющие на физико-механические свойства – элементы ПА-VIIA подгруппы, и некоторые элементы VIIIA и III-IVB подгруппы;
2. положительно влияющие на коррозионную стойкость и биосовместимость – элементы IIIA-VIIIA подгруппы и некоторые элементы IIA, IB-IVB подгруппы;
3. положительно влияющие на литейные свойства – элементы IIA-IIIA, IB подгруппы и некоторые элементы IVA, VA, VIIIA, IIB-VB подгруппы.

Проведен анализ статистической информации, содержащейся в БД, с целью определения ЛЭ, которые оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства литейных никелевых СС, для их включения в математическое моделирование зависимости свойств от состава СС, и определение оптимальных диапазонов содержания этих ЛЭ, обеспечивающих максимум свойств.

Оптимальной является такая концентрация ЛЭ в сплаве, которая обеспечивает максимум свойств литейных никелевых СС. С этой целью строили гистограммы распределения литейных никелевых СС в исходной выборке сплавов в БД. Количество интервалов гистограммы m определяется согласно формуле Стерджеса для объема выборки N :

$$m = 1 + \log_2 N, \quad (1)$$

а границы k -го интервала концентраций ЛЭ

$$c_{k \min} = c_{\min} + \frac{c_{\max} - c_{\min}}{m} (k - 1); c_{k \max} = c_{\min} + \frac{c_{\max} - c_{\min}}{m} k. \quad (2)$$

Основным классификационным признаком при построении гистограммы являются величины свойств литейных никелевых СС, а вспомогательным - количество СС в БД, принадлежащих соответствующему интервалу концентраций ЛЭ:

$$p_k = \frac{n_k}{N}, \quad (3)$$

где n_k – число литейных никелевых СС, концентрация ЛЭ в котором соответствует k -му интервалу.

В этом случае удельное число никелевых СС, соответствующих k -му интервалу концентраций ЛЭ (высота k -го столбца гистограммы) определяется по формуле:

$$h_k = \frac{p_k \bar{w}_k}{\sum_k p_k \bar{w}_k} = \frac{\sum_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\bar{w}_k$ - среднее значение свойств сплавов, принадлежащих к k -му интервалу, $k = 1, \dots, i$.

На основе проведенного анализа произведен выбор основных ЛЭ, определяющих свойства литейных никелевых СС: Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, Ta, V, C, PЗМ, Si, Mn, Fe. А также определены диапазоны концентраций, при которых литейные никелевые СС будут обладать комплексом максимальным свойств.

В четвертой главе разработана система автоматизированного проектирования литейных никелевых СС, с помощью которой была разработана математическая модель и осуществлен поиск оптимального состава литейного

никелевого СС.

С использованием метода ИНС и на основе анализа статистической информации о составах и свойствах литейных никелевых СС разработаны 24 математические модели, описывающие влияние концентраций основных ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС.

Была разработана методика селекции математических моделей, которая позволяет достоверно оценить адекватность и прогностические свойства модели. Методика основана на сравнении 4 показателей адекватности и прогнозировании математических моделей: параметр Бокса-Ветца, дисперсия адекватности, коэффициент детерминации и средняя относительная ошибка аппроксимации.

На основе разработанной методики селекции была выбрана наиболее адекватная математическая модель влияния концентрации ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Синдром}_{11} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} -0,197 \cdot x_{Cr} - 0,393 \cdot x_{Co} - 0,777 \cdot x_W + 0,800 \cdot x_{Mo} + 0,039 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,077 \cdot x_{Al} - 0,118 \cdot x_C - 0,133 \cdot x_{Ta} + 0,139 \cdot x_{Nb} + 0,999 \cdot x_{Si} + \\ + 0,081 \cdot x_{Mn} + 0,167 \cdot x_{Fe} - 0,342 \cdot x_{P3M} - 0,315 \cdot x_B + 0,329 \cdot x_{Грунна} - 0,026 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{12} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,132 \cdot x_{Cr} - 0,185 \cdot x_{Co} - 0,080 \cdot x_W + 0,272 \cdot x_{Mo} + 0,031 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,028 \cdot x_{Al} - 0,056 \cdot x_C + 0,015 \cdot x_{Ta} - 0,018 \cdot x_{Nb} + 0,056 \cdot x_{Si} + \\ + 0,094 \cdot x_{Mn} - 0,038 \cdot x_{Fe} - 0,106 \cdot x_{P3M} + 0,542 \cdot x_B + 0,027 \cdot x_{Грунна} + 0,056 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{13} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,870 \cdot x_{Cr} - 0,397 \cdot x_{Co} - 0,223 \cdot x_W + 0,999 \cdot x_{Mo} + 0,830 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,309 \cdot x_{Al} - 0,332 \cdot x_C - 0,196 \cdot x_{Ta} - 0,212 \cdot x_{Nb} - 0,247 \cdot x_{Si} + \\ + 0,007 \cdot x_{Mn} - 0,523 \cdot x_{Fe} - 0,147 \cdot x_{P3M} - 0,008 \cdot x_B + 0,073 \cdot x_{Грунна} + 0,091 \end{array} \right) \\ \text{Синдром}_{21} = \text{Сигмоида}_2 (-0,371 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,999 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,708 \cdot \text{Синдром}_{13} + 0,130) \\ \text{Синдром}_{22} = \text{Сигмоида}_2 (-0,177 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,419 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,676 \cdot \text{Синдром}_{13} - 0,482) \\ \tilde{\sigma}_{0,2} = 0,999 \cdot \text{Синдром}_{21} - 0,917 \cdot \text{Синдром}_{22} - 0,738 \\ \sigma_{0,2} = \frac{903 \cdot \tilde{\sigma}_{0,2} + 1121}{2} \end{array} \right. \quad (5)$$

где Синдром - сигнал нейрона с предыдущего слоя на нейрон текущего слоя;

x – числовые данные подаваемые на вход ИНС (концентрация ЛЭ);

$\sigma_{0,2}$ - расчетное значение предела текучести;

$\tilde{\sigma}_{0,2}$ - кодированное расчетное значение предела текучести.

Для поиска состава литейных никелевых СС, обладающего максимальным пределом текучести, использовался метод сопряженных градиентов, так как данный метод учитывает не только направление градиента на текущем шаге, но и направление предыдущего. В качестве параметра оптимизации использовался отклик функции, представляющую собой математическую модель №11.

Алгоритм поиска максимального значения математической модели (см. рисунок 3):

Шаг 1. Принять x_0 за центр области определения модели (оптимальный диапазон концентраций).

Шаг 2. Вычислить градиент в точке x_0 - $\bar{p}_0 = \text{grad}_0 = f'(\bar{x}_0)$.

Шаг 3. Перейти в точку $\bar{x}_j = \bar{x}_{j-1} + \eta \bar{p}$ с заданным шагом η .

Шаг 4. Вычислить градиент $\text{grad}_{j+1} = f'(\bar{x}_{j+1})$.

Шаг 5. Вычислить коэффициент сопряжения $\beta_{j+1} = \frac{\text{grad}_{j+1}^T (\text{grad}_{j+1} - \text{grad}_j)}{\text{grad}_j^T \text{grad}_j}$.

Шаг 6. Вычислить новое сопряженное направление (длину вектора)
 $\bar{p}_{j+1} = \beta_{j+1} \bar{p}_j - \text{grad}_{j+1}$.

Шаг 7. Повторить шаги 3-6 до выполнения условия $f(x_j) < f(x_{j+1})$.

С использованием выбранной математической модели методом сопряженных градиентов по поверхности отклика определен состав литейного никелевого СС под условным названием «Нейростом» (см. таблицу 1), имеющего прогнозируемый предел текучести $\sigma_{0,2} = 941.144$ МПа.

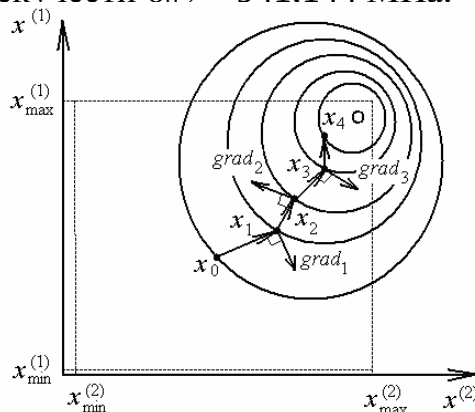


Рисунок 3 – Поиск максимального значения функции по поверхности отклика методом сопряженных градиентов

Таблица 1

Состав разработанного литейного никелевого СС «Нейростом», вес. %

Элемент	Ni	Cr	W	Mo	C	Ta	Si	Mn	PЗМ	B
Концентрация	65,881	25,090	1,480	4,000	0,113	0,685	0,143	1,116	0,472	0,020

На разработанную систему автоматизированного синтеза литейных никелевых СС получено свидетельство РосПатента о регистрации программы.

Пятая глава посвящена исследованию свойств разработанного сплава «Нейростом». Исследовались физико-механические, коррозионные и литейные показатели сплава и сравнивались с серийным сплавом «Медар-сервис».

Для изготовления заготовок сплава «Нейростом» применялись стандартные шихтовые материалы, используемые при производстве никельсодержащих сплавов. Выплавка заготовок производили в вакуумной индукционной печи УППФ-3М с электрокорундовым тиглем.

Шихтовые заготовки серийного сплава «Медар-сервис» закупались у производителя и представляли собой прутки диаметром 15мм и длиной 200 мм.

Каждая выплавка подвергалась спектральному анализу на оптико-эмиссионном спектрометре SPECTROMAXx, чувствительность которого по большинству элементов составляет 0,001% (по некоторым до 0,0001%). Химический состав сплавов приведен в таблице 2 и таблице 3.

Для возможности сравнения свойств сплава «Нейростом» со свойствами сплава «Медар-сервис» были отлиты методом литья по выплавляемым моделям образцы для испытаний на физико-механические свойства (предел текучести с остаточной деформацией 0,2%, предел временного сопротивления, относительное удлинение, твердость по Виккерсу, КТР, коррозионная стойкость).

Испытания на статическое растяжение (разрыв) проводились по ГОСТ 1497-84 на испытательной машине Zwick-Roell Z100 при комнатной температуре. Результаты исследования временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения приведены на рисунке 4.

Испытания на твердость по Виккерсу проводились по ГОСТ 2999-75

на твердомере ТП при комнатной температуре. Результаты исследования твердости приведены на рисунке 5.

Таблица 2

Химический состав разработанного литейного никелевого стоматологического сплава «Нейростом» (никель основа), %

Элемент	Легирующие элементы									Примеси						
	Cr	Mo	W	C	Ta	Si	Mn	B	Ce	Nb	Fe	Al	Cu	Ca	S	P
Концентрация	25,39	4,09	1,486	0,113	0,704	0,144	1,127	0,020	0,473	0,054	0,050	0,049	0,01	0,0050	0,0050	0,0052

Таблица 3

Химический состав серийного литейного никелевого стоматологического сплава «Медар-сервис» (никель основа), %

Элемент	Легирующие элементы								Примеси							
	Cr	Mo	Nb	C	Mn	Si	Fe	B	Ce	W	Ta	Al	Cu	Ca	S	P
Концентрация	24,48	9,30	1,255	0,017	0,526	1,248	0,245	0,012	0,017	0,077	0,058	0,050	0,02	0,0050	0,0085	0,0088

Результаты исследования механических свойств сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» показали, что разработанный сплав имеет более высокие прочностные характеристики, чем серийный сплав, с относительно малым понижением пластичности (см. рисунок 4). Повышение прочностных свойств разработанного сплава «Нейростом» обосновывается тем, что в сплаве содержится вольфрам, который входит в состав γ -твердого раствора и γ' -фазы разработанного сплава и повышает его прочностные характеристики.

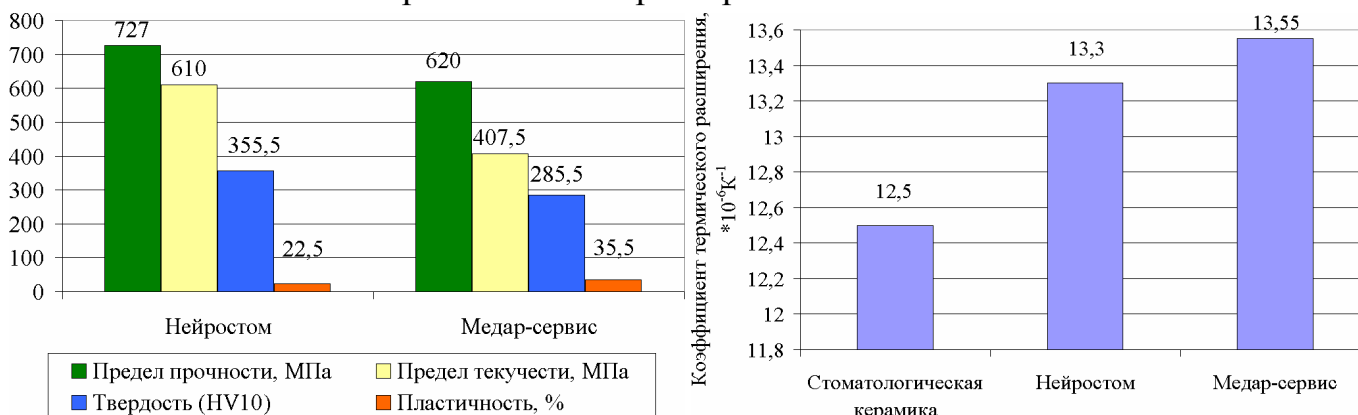


Рисунок 4 - Результаты механических испытаний образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис»

Рисунок 5 – Коэффициент термического расширения в диапазоне температур 20-600°C для сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» и керамической массы Duceram® PLUS

Кроме того, в состав разработанного сплава входит тантал, который является γ' -образующим элементом и стабилизирует выделение упрочняющей γ' -фазы в сплаве, что также повышает его прочностные свойства и твердость по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис».

Испытания на КТР проводились по ГОСТ 14080-78 с применением дилатометра марки Linseis L76 в интервале температур от 20°C до 600°C. Разброс свойств по КТР для сплава «Нейростом» составляет 13,21...13,40·10⁻⁶К⁻¹, против соответственно 13,51...13,60·10⁻⁶К⁻¹ для сплава «Медар-сервис».

Анализ результатов испытаний образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» на КТР в интервале температур 20-600°C (см. рисунок 5) показал, что разработанный сплав обладает несколько меньшим КТР, что обеспечивается снижением концентрации Мо.

Испытания на коррозионную стойкость проводились по ГОСТ Р 51767-2001 (Приложение А) с помощью фотоколориметра Hanna C-200. Разброс свойств

для сплава «Нейростом» по потере массы никеля составляет 1,26...1,28 мг/см², по потере массы хрома – 0,13...0,16 мг/см², по потере массы молибдена – 0,09...0,12 мг/см² и по суммарной потере массы – 1,48...1,57 мг/см², против свойств для сплава «Медар-сервис» соответственно 2,36...2,76 мг/см², 0,16...0,23 мг/см², 0,12...0,16 мг/см² и 2,64...3,15 мг/см².

Потеря массы сплава «Нейростом» ниже в 2 раза, чем сплава «Медар-сервис», что свидетельствует о высокой коррозионной стойкости разработанного сплава. Повышение коррозионной стойкости сплава «Нейростом» достигается путем повышения концентрации хрома, а также марганца и церия, которые, помимо устранения вредного влияния серы, повышают адгезию защитных окисных пленок.

Помимо, хрома, марганца и церия, повышение коррозионной стойкости разработанного сплава обосновывается тем, что сплав «Нейростом» в отличие от серийного сплава содержит бор, который снижает термодинамическую активность углерода и улучшают морфологию карбидов, снижающие стабильность γ -твердого раствора и инициирующие образование карбидов типа $Me_{23}C_6$ на границах зерен.

В отличие от «Медар-сервис», «Нейростом» имеет более высокую концентрацию церия, что способствует наиболее эффективному устранению вредного влияния S, что повышает биологическую совместимость с организмом человека.

Определение критических температур сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили по кривым охлаждения расплавленного металла в тигле плавильной печи. Результаты измерений приведены в таблице 4. Видно, что сплаву «Нейростом» соответствуют более низкие значения температур ликвидус и солидус, а также меньшая ширина интервала кристаллизации, чем у сплава «Медар-сервис».

Таблица 4

Параметры кристаллизации сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис»

Сплав	Критические температуры, °C		Интервал кристаллизации, °C
	T_L	T_S	
«Нейростом»	1358	1321	37
«Медар-сервис»	1351	1303	48

Сужение интервала кристаллизации разработанного сплава «Нейростом» происходит в основном за счет повышения температуры солидус. Это вызвано тем, что вольфрам в сплаве повышает термическую стабильность γ -твердого раствора, а также влиянием γ' -фазы Ni_3Ta , которая имеет высокую температуру кристаллизации в сплаве «Нейростом». Относительное малое повышение температуры ликвидус в этой системе объясняется тем, что в твердых растворах основное выделение теплоты кристаллизации происходит ближе к температуре ликвидус, что увеличивает время стояния ликвидуса.

Известно, что сужение интервала кристаллизации приводит к уменьшению разветвленности дендритов, понижает температуру нулевой жидкотекучести и улучшает жидкотекучесть. Поэтому затвердевание узкоинтервальных сплавов происходит за счет равномерного перемещения фронта раздела твердой и жидкой фазы, в отличие от широкоинтервальных сплавов, затвердевание которых происходит за счет увеличения зоны твердожидкого состояния.

Литейные свойства сплавов исследовали на двух пробах: комплексной пробе Купцова-Нехензи (см. рисунок 6) - для испытания нового сплава в производственных условиях, и специализированной пробе по ГОСТ Р 51767-2001 (см. рисунок 7) - для испытания нового сплава в условиях

изготовления единичной стоматологической отливки.

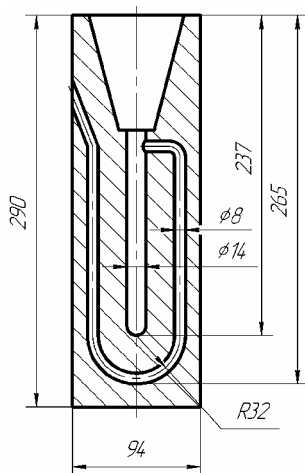


Рисунок 6 - Комплексная проба
Купцова-Нехензи

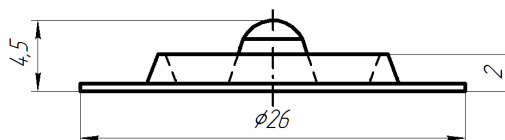


Рисунок 7 – Специализированная
проба по ГОСТ Р 51767-2001

Сравнительное исследование литейных свойств сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили на оболочковых формах-пробах, аналогичных по конфигурации малой комплексной пробе для испытания цветных металлов. Проба позволяет одновременно определить жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объем усадочных пороков. Оболочковые формы пробы изготавливали по выплавляемым моделям по методике изложенной в главе 2.

После остывания каналы пробы вскрывали и определяли жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объемы усадочных пороков.

Условно-истинную жидкотекучесть сплавов определяли по длине заполнения U-образного канала по шкале, нанесенной на стенках полуформ, по плоскости разреза. Объем данного канала составляет только 15% от объема конусной части пробы, поэтому сохраняется постоянство металлостатического напора при заполнении пробы при условии полного прекращения заливки. Результаты определения жидкотекучести приведены в таблице 5.

В комплексной пробе имелось 4 участка различной длины, где наблюдалось торможение усадки залитого сплава, дающие возможность судить о склонности сплава к образованию трещин. Проведенные исследования показывают, что все сплавы имеют на пробе трещины. Ширину трещин замеряли штангенциркулем по осевой линии канала между соответствующими точками бывшего соединения. Результаты измерения суммарной ширины трещин на всех участках торможения малой комплексной формы приведены в таблице 5.

Определение усадочных пороков производили на конусном образце сплава, получаемом в воронке пробы. Результаты исследования усадочных пороков приведены в таблице 5.

Линейную усадку сплавов определяли по усадке центрального прутка диаметром 15 мм в вертикальном канале формы. Верхняя часть этого прутка в месте ответвления U-образного канала получается жестко закрепленной, а нижняя может при усадке свободно перемещаться вверх. Внизу, между свободным концом прутка и кромкой канала, образуется усадочный зазор Δl , величина которого позволяет определить линейную усадку исследуемых сплавов. Измерение усадочного зазора производили штангенциркулем с точностью до 0,05 мм. Результаты исследования линейной усадки приведены в таблице 5.

Сравнительное исследование жидкотекучести также проводили на специализированной пробе согласно ГОСТ Р 51767-2001. Количественной мерой жидкотекучести по ГОСТ Р 51767-2001 служит высота кольца пробы

с трапециевидным сечением – параметр h . Данный показатель измерялся посредством оптической измерительной системы ATOS II XL, с помощью программного комплекса Geomagic Qualify. Таким образом, наибольшей жидкотекучестью обладали те сплавы, которые наиболее точно воспроизводили параметр h . Результаты исследования на жидкотекучесть приведены в таблице 5.

Таблица 5

Литейные свойства образцов сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» на жидкотекучесть по комплексной пробе

	Нейростом	Медар-сервис
Жидкотекучесть по комплексной пробе, мм	376	369
Жидкотекучесть по специализированной пробе, мм	1,95	1,91
Сумма длин трещин, мм	2,66	3,11
Склонность к образованию усадочных пороков:		
- концентрированная усадочная раковина, %	1,54	1,69
- объем усадочных пор, %	2,79	2,86
Линейная усадка, %	2,13	2,17

Результаты испытания показали, что литейные свойства разработанного сплава «Нейростом» находятся на уровне свойств серийного сплава «Медар-сервис».

Однако некоторое повышение показателей жидкотекучести разработанного сплава «Нейростом» по сравнению с серийным достигается путем введения в сплав тантала.

Введение в разработанный сплав церия и снижение концентрации кремния, позволяет несколько снизить показатель литейной усадки.

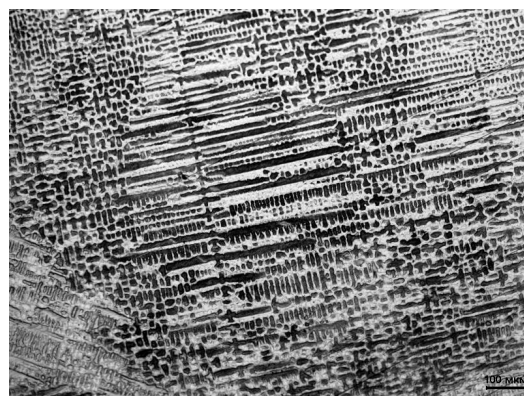
Согласно таблице 5 сплав «Нейростом» обладает большей трещиностойкостью, чем сплав «Медар-сервис». Это можно объяснить тем, что сплав «Нейростом» имеет достаточную пластичность при высоких прочностных показателях (см. таблицу 4) и меньшую величину литейной усадки (см. таблицу 5), чем сплав «Медар-сервис».

Некоторое понижение склонности к образованию усадочных пороков сплава «Нейростом» (см. таблицу 5) можно объяснить уменьшением разветвленности дендритов (см. рисунок 8) за счет сужения интервала кристаллизации, что способствует улучшению питания микрообъемов отливок и уменьшает склонность к усадочной пористости.



а)

(×100)



б)

Рисунок 8 – Микроструктура сплавов «Нейростом» (а) и «Медар-сервис»(б)

Для исследования структуры сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» были изготовлены микрошлифы, выполненные в поперечном сечении образцов.

Исследование микроструктуры показали, что сплав «Нейростом» имеет

более равномерную и упорядоченную структуру по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис». В структуре разработанного сплава отсутствуют заметные выделения карбидных фаз, способных стать концентраторами напряжений (см. рисунок 5), что делает сплав «Нейростом» более пластичным и менее склонным к преждевременному разрушению.

В микроструктуре сплава «Нейростом» крупных избыточных фаз не наблюдается, а сплав «Медар-сервис» имеет ярко выраженное дендритное строение с типичным для такой структуры неоднородным распределением ЛЭ.

Исследования микроструктуры показали, что при одинаковых параметрах технологического процесса литья сплав «Нейростом» имеет более совершенное дендритное строение, чем серийный сплав «Медар-сервис», что способствует повышению пластичности и снижению склонности к преждевременному разрушению. Это можно объяснить введением в сплав «Нейростом» элементов повышающих стабильность γ -твердого раствора и устраняющих вредное влияние примесей, а также меньшей шириной интервала кристаллизации.

Сплав «Нейростом», при плавке как в промышленных, так и в стоматологических печах, показал себя технологичнее серийного «Медар-сервис». С футеровкой и формой из электрокорунда и из стоматологической паковочной массы взаимодействия сплава «Нейростом» не наблюдается.

Исходя из данных по температуре плавления сплава «Нейростом» его рекомендуемая температура заливки должна составлять 1410...1440°C. Наблюдения показали, при данной температуре разработанный сплав оптимально заполняет все полости формы.

На основании результатов исследования можно рекомендовать СС «Нейростом» к серийному производству для изготовления неснимаемых зубных протезов.

В приложениях приведены:

1. БД «База данных по литейным никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии».
2. Рисунки из главы 3.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана новая методика автоматизированного синтеза литейных никелевых СС, основанная на априорной информации о составах и свойствах известных СС, которая позволяет в 4...5 раз сократить сроки создания новых многокомпонентных СС, в 40...50 раз снизить трудозатраты, в 10...20 раз сэкономить расход дорогостоящих материалов.
2. Разработана математическая модель влияния ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС с помощью созданной программы, реализующей методику автоматизированного проектирования сплавов с использованием метода ИНС.
3. С помощью математического моделирования разработан новый многокомпонентный литейный СС на никелевой основе «Нейростом» и технологический процесс литья зубных протезов из разработанного сплава, на который получен патент РФ №2284363.
4. Впервые создана тематическая БД по литейным никелевым СС, применяемых для изготовления коронок, мостов и неснимаемых протезов. На основе БД была разработана ИПС, которая предоставляет систематизированные сведения о литейных никелевых СС по основным физико-механическим, технологическим и эксплуатационным характеристикам. Получено свидетельство РосПатента №2004620060 об официальной регистрации разработанной БД.
5. Была решена проблема наполнения БД по КТР, что позволило провести

сравнительный анализ современных литейных никелевых СС, полученных из разных первоисточников, КТР которых приведены в различных диапазонах температур. В результате необходимый для математического моделирования объем выборок увеличился в 1,5-2 раза.

6. Определены оптимальные области содержания ЛЭ в литейных никелевых СС методом построения гистограмм распределения литейных никелевых СС в зависимости от их свойств.

7. В производственных и лабораторных условиях были произведены плавки СС «Нейростом», исследованы его физико-механические и литейные свойства. Данные, полученные в результате анализа проведенных исследований, показали, что сплав «Нейростом» обладает более высокими физико-механическими и литейными свойствами по сравнению с серийным сплавом «Медар-сервис».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Ганеев, А.А. Классификация элементов периодической системы Д.И. Менделеева по их влиянию на служебные свойства никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Никифоров П.Н. // Литейщик России. – 2009. – №12. – С.32-34.
2. Ганеев, А.А. Методика аналитического синтеза стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Федорова Н.А. // Ползуновский вестник. – 2005. - № 2. – С. 85-88.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Ганеев, А.А. Современные сплавы, применяемые в бюгельном протезировании / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Авиационно-технологические системы: Межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2004. – С. 115-121.
2. Ганеев, А.А. Информационное обеспечение методики компьютерного проектирования никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Вестник Алтайского государственного технического университета. - 2005. - №3-4. – С. 136-139.
3. Ганеев, А.А. Компьютерный синтез никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш. // Труды 2-го Международного форума «Актуальные проблемы современной науки». Медицинские науки. Часть 28. Секция: СТОМАТОЛОГИЯ. – Самара. 2006. – С. 81-85.
4. Ганеев, А.А. Методика компьютерного синтеза никелевых сплавов, применяемых для изготовления неснимаемых зубных протезов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Ползуновский альманах – 2006. - №3. – С. 110-113.
5. Ганеев, А.А. Современные проблемы компьютерного проектирования никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Мавлютовские чтения: Российская научно-техническая конференция, посвященная 80-летию со дня рождения чл.-кор. РАН, профессора Р.Р. Мавлютова: сб. трудов. Т.5. – Уфа: УГАТУ, 2006. – С. 29-34.
6. Ганеев, А.А. Нейросетевые подходы к проектированию новых никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 189-191.
7. Шайхутдинова, Е.Ф. Синтез новых никелевых стоматологических сплавов с использованием нейросетевых методов // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, приборостроение, экономика и гуманитарные науки // Сборник трудов четвертой всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, 19-21 февраля 2009 г. – Уфа: Изд-во «Диалог», 2009. – С. 397-401.

8. Шайхутдинова, Е.Ф. Выбор легирующего ряда для никелевых стоматологических сплавов / Шайхутдинова Е.Ф., Ганеев А.А., Деменок О.Б. // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: Сб. науч. тр. / Под общ. ред. А.М.Гурьева и В.А. Маркова. – Вып. 5. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 110-114.
9. Ганеев, А.А. Исследование эксплуатационных свойств разработанного никелевого стоматологического сплава / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. // Литейные процессы: Межрегиональный сборник научных трудов. - Вып. 9. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. - С. 19-26.
10. Шайхутдинова, Е.Ф. Разработка математической модели влияния химического состава на свойства никелевых стоматологических сплавов с помощью метода искусственных нейронных сетей // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / УГАТУ – Уфа: УГАТУ, 2010. – с.145-147.
11. Шайхутдинова, Е.Ф. Автоматизированное проектирование никелевых сплавов, применяемых для изготовления литых зубопротезных заготовок / Шайхутдинова Е.Ф., Ганеев А.А. // Ползуновский альманах – 2010. - №1. – С. 14-18.
12. Никифоров, П.Н. Процессы формирования отливки: Лабораторный практикум по дисциплине «Теория формирования отливки» / Шайхутдинова Е.Ф. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 24 с.
13. Никифоров, П.Н. Заливка и кристаллизация расплава в форме: Лабораторный практикум по дисциплине «Основы затвердевания отливки» / Шайхутдинова Е.Ф. – Уфа: УГАТУ, 2010. – 24 с.
14. Шайхутдинова, Е.Ф. Математическое моделирование и синтез сплавов [Электронный ресурс]: практикум / Ганеев А.А., Смирнов В.В., Никифоров П.Н. - ГОУ ВПО УГАТУ. - Учебное электронное издание. - Уфа: УГАТУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см (рег. свид. № 19527 от 30.06.2010).
15. Свидетельство РосПатента №20044620060 об официальной регистрации базы данных. База данных по никелевым сплавам, применяемым в ортопедической стоматологии / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш. Дата регистрации 26.02.2004.
16. Пат.2277602 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С19/05, А61К6/04. Литейный сплав для стоматологии / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Якупов Р.Ш.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. - №2005110491; заявл. 11.04.05; опубл. 10.06.06.– 4 с.
17. Пат.2284363 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С19/05, А61К6/04. Сплав на никелевой основе для стоматологических изделий под керамику / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Шевлякова Э.А.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. - №2005112112; заявл. 22.04.05; опубл. 27.09.06. – 4 с.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009612746. Автоматизированное проектирование никелевых стоматологических сплавов / Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Дата регистрации 28.05.2009.

Шайхутдинова Евгения Флюровна

СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2011. Формат 60 x 84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.- изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 128

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа – центр, ул. К.Маркса, 12