

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ

Е.Ф. Шайхутдинова, А.А. Ганеев, А.И. Мезенцева

Предлагаемый метод позволяет разработать литейный никелевый стоматологический сплав с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств. Разработана тематическая база данных, классификация легирующих элементов по их влиянию на свойства, математические модели и метод их селекции. Проведена проверка эффективности предлагаемого метода синтеза литейных никелевых стоматологических сплавов.

Ключевые слова: синтез сплавов; литейные никелевые стоматологические сплавы; физико-механические и литейные свойства.

Повышающиеся требования к материалу и конструкции протезов не позволяют использовать устаревшие сплавы. На данный момент отсутствуют литейные никелевые сплавы, отвечающие требованиям ортопедической стоматологии [1].

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 методов разработки новых сплавов. Наряду с традиционными методами, необходимым инструментом становятся формальные методы компьютерного проектирования.

Разработка и развитие формальных методов прогнозирования свойств стоматологических сплавов (СС), опирающихся на использование методов классического металловедения и математического моделирования, относятся к наиболее приоритетным и актуальным научно-техническим задачам.

Поэтому целью данной работы является разработка нового литейного никелевого СС на основе метода автоматизированного проектирования, который бы минимизировал временные и материальные затраты.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка базы данных (БД) по современным литейным никелевым СС.
2. Разработка метода восстановления недостающей информации в БД о свойствах литейных никелевых СС.
3. Разработка методики оценки оптимальных диапазонов концентраций легирующих элементов (ЛЭ) в литейных никелевых СС

на основе обобщения статистической информации из БД.

4. Разработка математической модели влияния ЛЭ на наиболее значимое физико-механическое свойство (предел текучести) литейных никелевых СС и программная реализация алгоритмов данного расчета.

5. Разработка алгоритмов и программная реализация проектных процедур, связанных с определением концентраций ЛЭ, обеспечивающих максимум предела текучести литейных никелевых СС.

6. Разработка системы автоматизированного проектирования литейных никелевых СС.

7. Экспериментальная оценка эффективности разработанной методики синтеза никелевых СС на основе исследования физико-механических и литейных свойств синтезированного сплава.

Анализ рассмотренных методов математического моделирования показал, что для решения задач синтеза литейных никелевых СС могут применяться интеллектуальные методы (искусственные нейронные сети (ИНС) и метод группового учета аргументов (МГУА)). 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 [2]. Таким образом, метод ИНС оптимально соответствует задаче проектирования

литейных никелевых СС.

Схема методики синтеза литейных никелевых СС представлена на рисунке 1.

Для информационного обеспечения синтеза литейных никелевых СС необходимо создание тематической БД.

В созданную тематическую БД по литейным никелевым СС вошли сведения о составах и физико-механических свойствах, имеющиеся в отечественной и зарубежной литературе по данной тематике с глубиной поиска 30 лет по конец 2011 года включительно. БД содержит информацию по более чем 220 современным литейным никелевым СС, используемым для получения отливок. Для каждого СС указаны концентрации основных ЛЭ и примесей, физико-механические свойства, технологические и эксплуатационные характеристики, а также источники, из которых взята информация.

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.

Была решена проблема наполнения БД по КТР, т.е. 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 [3].

На разработанную БД по литейным никелевым СС получено свидетельство РосПатента.

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 [4]. 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-IIIA, IB подгруппы и некоторые элементы IVA, VA, VIIIA, IIB-VB подгруппы.

Для определения оптимальных диапазонов содержания ЛЭ в литейных никелевых СС были построены гистограммы распределения никелевых СС.

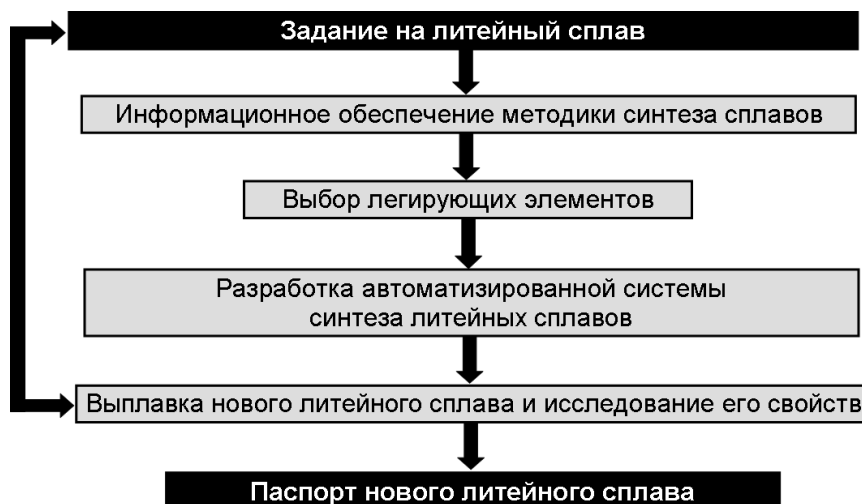


Рисунок 1 - Схема методики синтеза литейных сплавов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ

На основе проведенного анализа произведен выбор основных ЛЭ, определяющих свойства литейных никелевых СС, а также определены диапазоны концентраций, при которых литейные никелевые СС будут обладать комплексом максимальных свойств.

Далее была разработана методика синтеза новых литейных никелевых СС, основанная на комплексном использовании метода ИНС для расчета математической модели влияния ЛЭ на предел текучести никелевых СС и методе сопряженных градиентов, для нахождения экстремума свойств [2].

На основе предложенной математической методики разработана система автоматизированного проектирования литейных никелевых СС [5], на которую получено свидетельство РосПатента.

С использованием разработанной методики, которая позволяет наиболее достоверно оценить влияние ЛЭ на свойства литейных никелевых СС, на основе анализа статистической информации о составах и свойствах литейных никелевых СС построены 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 [5].

На основе разработанной методики селекции была выбрана наиболее адекватная математическая модель влияния концентрации ЛЭ на предел текучести литейных никелевых СС (1).

С использованием выбранной математической модели методом сопряженных градиентов по поверхности отклика определен состав литейного никелевого СС под условным названием «Нейростом», имеющего прогнозируемый предел текучести $\sigma_{0,2} = 941,144$ МПа.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} \text{Синдром}_{11} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} -0,197 \cdot x_{Cr} - 0,393 \cdot x_{Co} - 0,777 \cdot x_W + 0,800 \cdot x_{Mo} + 0,039 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,077 \cdot x_{Al} - 0,118 \cdot x_C - 0,133 \cdot x_{Ta} + 0,139 \cdot x_{Nb} + 0,999 \cdot x_{Si} + \\ + 0,081 \cdot x_{Mn} + 0,167 \cdot x_{Fe} - 0,342 \cdot x_{P3M} - 0,315 \cdot x_B + \\ + 0,329 \cdot x_{Группа} - 0,026 \end{array} \right) \\ \\ \text{Синдром}_{12} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,132 \cdot x_{Cr} - 0,185 \cdot x_{Co} - 0,080 \cdot x_W + 0,272 \cdot x_{Mo} + 0,031 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,028 \cdot x_{Al} - 0,056 \cdot x_C + 0,015 \cdot x_{Ta} - 0,018 \cdot x_{Nb} + 0,056 \cdot x_{Si} + \\ + 0,094 \cdot x_{Mn} - 0,038 \cdot x_{Fe} - 0,106 \cdot x_{P3M} + 0,542 \cdot x_B + \\ + 0,027 \cdot x_{Группа} + 0,056 \end{array} \right) \\ \\ \text{Синдром}_{13} = \text{Сигмоида}_1 \left(\begin{array}{l} 0,870 \cdot x_{Cr} - 0,397 \cdot x_{Co} - 0,223 \cdot x_W + 0,999 \cdot x_{Mo} + 0,830 \cdot x_{Ti} + \\ + 0,309 \cdot x_{Al} - 0,332 \cdot x_C - 0,196 \cdot x_{Ta} - 0,212 \cdot x_{Nb} - 0,247 \cdot x_{Si} + \\ + 0,007 \cdot x_{Mn} - 0,523 \cdot x_{Fe} - 0,147 \cdot x_{P3M} - 0,008 \cdot x_B + \\ + 0,073 \cdot x_{Группа} + 0,091 \end{array} \right) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Синдром}_{21} = \text{Сигмоида}_2 (-0,371 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,999 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,708 \cdot \text{Синдром}_{13} + 0,130) \\ \text{Синдром}_{22} = \text{Сигмоида}_2 (-0,177 \cdot \text{Синдром}_{11} + 0,419 \cdot \text{Синдром}_{12} - 0,676 \cdot \text{Синдром}_{13} - 0,482) \\ \tilde{\sigma}_{0,2} = 0,999 \cdot \text{Синдром}_{21} - 0,917 \cdot \text{Синдром}_{22} - 0,738 \\ \sigma_{0,2} = \frac{903 \cdot \tilde{\sigma}_{0,2} + 1121}{2} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

Разработанный с помощью методов математического моделирования, сплав «Нейростом» исследовался на физико-механические, коррозионные и литейные

показатели. Свойства разработанного сплава сравнивались с аналогичными характеристиками серийного СС «Медар-сервис». Химический состав разработанного и серийного

сплава приведен в таблице 1.

Для возможности сравнения свойств разработанного и серийного сплава 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, коэффициент термического расширения, коррозионная стойкость.

Испытания на статическое растяжение (разрыв) проводились по ГОСТ 1497-84 на испытательной машине Zwick-Roell Z100 при комнатной температуре. Разброс свойств по пределу прочности для сплава «Нейростом» составляет 716...738 МПа, по пределу текучести – 602...618 МПа и по относительному удлинению - 19...26 % (против соответственно 610...630 МПа, 395...420 МПа и 30...41 % для сплава «Медар-сервис»).

Испытания на твердость по Виккерсу проводились по ГОСТ 2999-75 на твердомере ТП при комнатной температуре. Разброс свойств по твердости для сплава «Нейростом» составляет 351...360 HV, против соответственно 281...290 HV для сплава «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».

Испытания на коррозионную стойкость проводились по ГОСТ Р 51767-2001 с помощью фотоколориметра Hanna C-200.

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

Определение критических температур сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили по кривым охлаждения расплавленного металла в тигле плавильной печи. Результаты измерений приведены в таблице 2. Видно, что сплаву «Нейростом» соответствуют более низкие значения температур ликвидус и солидус, а также меньшая ширина интервала кристаллизации, чем у сплава «Медар-сервис».

Сравнительное исследование литейных свойств разработанного и серийного сплава проводили на оболочковых формах-пробах, аналогичных по конфигурации малой комплексной пробе для испытания цветных металлов (проба Купцова-Нехендзи). Проба позволяет одновременно определить жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объем усадочных пороков и литейную усадку. Оболочковые формы пробы изготавливали по выплавляемым моделям (см. табл. 3).

Сопоставление разработанного СС и его серийного аналога показало, что разработанный сплав имеет более высокие физико-механические показатели с одновременным сохранением хороших литейных свойств. Кроме того, разработанный сплав по сравнению с серийным имеет упорядоченную структуру без явно выраженной дендритной структуры

Таблица 1 - Химический состав разработанного и серийного никелевых СС (никель основа)

Содержание ЛЭ, вес.														
Cr	Mo	W	C	Al	Ta	Nb	B	Cu	Ce	Fe	Si	Mn	S	P
24,09-26,34	3,84-4,20	1,465-1,524	0,107-0,119	0,048-0,051	0,699-0,719	0	0,019-0,021	<0,01	0,448-0,496	0,048-0,052	0,142-0,147	1,071-1,172	<0,0052	<0,0053
23,54-25,63	8,53-10,04	0	0,011-0,025	0	0	0,962-1,618	0,007-0,020	<0,028	0,015-0,019	0,116-0,336	0,941-1,557	0,319-0,732	<0,0093	<0,0095

Таблица 2 - Параметры кристаллизации разработанного и серийного никелевых СС

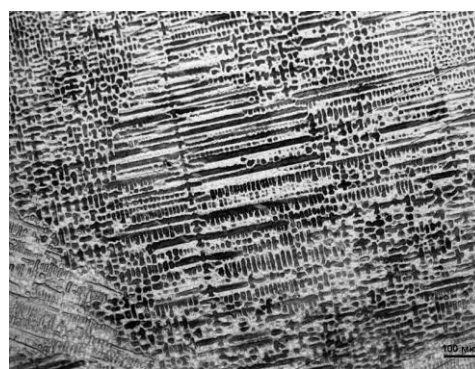
Сплав	Критические температуры, °C		Интервал кристаллизации, °C
	T _S	T _L	
«Нейростом»	1334	1298	36
«Медар-сервис»	1351	1303	48

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ



а)

(×100)



б)

Рисунок 3 - Микроструктура разработанного (а) и серийного (б) сплавов

Таблица 3 Результаты испытаний на литейные свойства разработанного (Нейростом) и серийного (Медар-сервис) сплавов по пробе Купцова-Нехендзи

	Разработанный сплав	Серийный сплав
Жидкотекучесть, мм	376	369
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

Таким образом, разработанная методика синтеза сплавов с применением интеллектуальных математических методов позволяет помимо гарантированного достижения результатов, в 4-5 раз сократить сроки разработки новых сплавов, снизить в 40-50 раз трудозатраты на разработку новых материалов и сэкономить в 10-20 раз дефицитные и дорогостоящие материалы.

4. Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Никифоров П.Н. Классификация элементов периодической системы Д.И. Менделеева по их влиянию на служебные свойства никелевых стоматологических сплавов // Литейщик России, 2009. №12. С. 32-34.

5. Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Нейросетевые подходы к проектированию новых никелевых стоматологических сплавов // Ползуновский альманах, 2008. № 3. С. 189-191.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корень В.Н., Хлебникова Т.В., Шашкина Т.Б. Основные тенденции изучения и разработки сплавов для ортопедической стоматологии // Зубной техник, 1997. №10. С. 25-29.
2. Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф., Федорова Н.А. Методика аналитического синтеза стоматологических сплавов // Ползуновский вестник, 2005. №2. С. 85-88.
3. Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Информационное обеспечение методики компьютерного проектирования никелевых стоматологических сплавов // Вестник Алтайского государственного технического университета, 2005. № 3-4. С. 136-139.

Шайхутдинова Е.Ф., к.т.н., старший преподаватель,

e-mail: eugen-shaikhutdinonova@yandex.ru

Ганеев А.А., д.т.н., профессор,

e-mail: mitlp@ugatu.ac.ru

Мезенцева А.И., ассистент,

e-mail: nastya.mezenceva@mail.ru

кафедра «Машины и технология литейного производства», ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа