

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ ЗАГОТОВОК

Е. Ф. Шайхутдинова, А. А. Ганеев

Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа, Россия

Одна из важнейших проблем стоматологии – производство высококачественных и недорогих литых 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 и низкими физико-механическими свойствами, 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, которые обладают высокими физико-механическими свойствами в сочетании с хорошей технологичностью.

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 необходимо создание новых литейных никелевых СС.

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

Разработка и развитие автоматизированных 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 метода автоматизированного проектирования, который бы минимизировал временные и материальные затраты.

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. Таким образом, метод ИНС оптимально соответствует задаче проектирования литейных никелевых СС.

Схема методики синтеза литейных никелевых СС с помощью ИНС 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 2009 года включительно. БД содержит информацию по более чем 200 современным литейным никелевым

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ ЗАГОТОВОК

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 разработанную БД по литейным никелевым СС было получено свидетельство РосПатента.

На основе анализа статистической информации, содержащейся в БД была разработана классификация ЛЭ по их влиянию на свойства литейных никелевых СС по их положению в периодической системе Д. И. Менделеева, т. к. описанные в литера-

туре классификации не позволяли однозначно определить влияние элемента на то или иное свойство. 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.

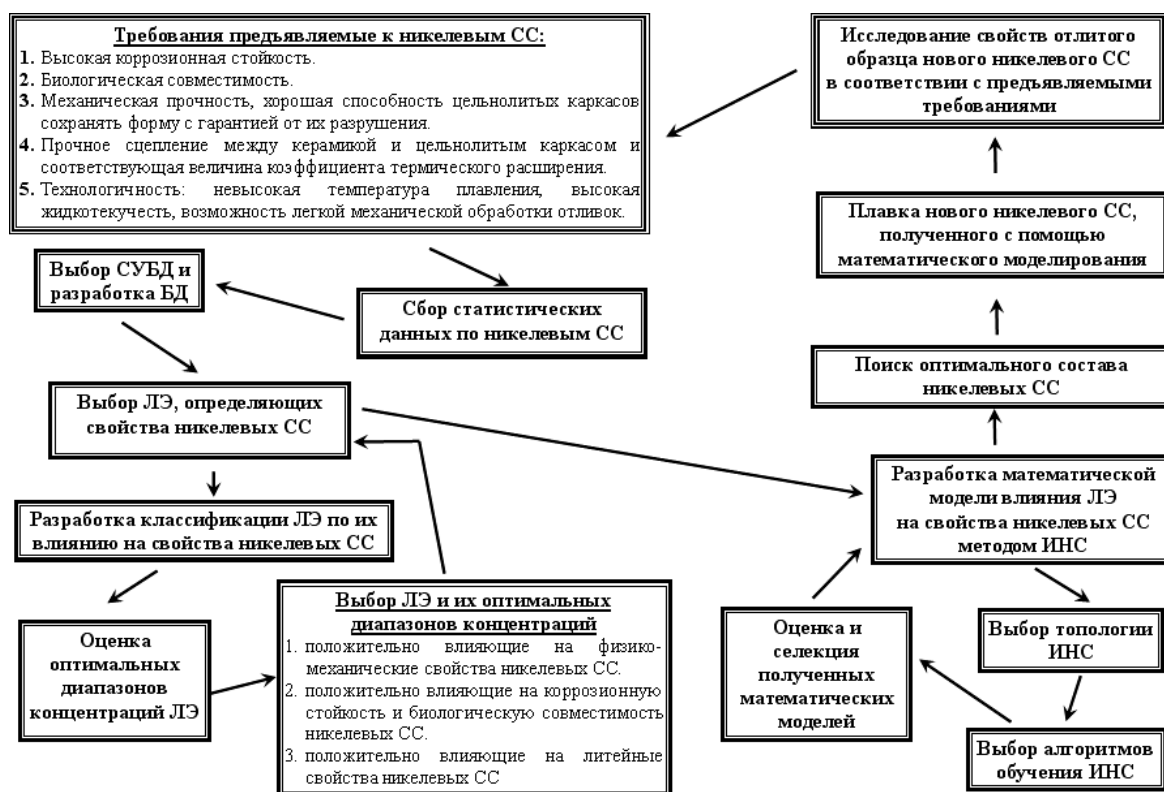


Рисунок 1 – Схема методики синтеза литейных никелевых СС

Для определения оптимальных диапазонов содержания ЛЭ в литейных никелевых СС были построены гистограммы распределения никелевых СС. Основным классификационным признаком при построении диаграммы являлись величины свойств литейных никелевых СС, а вспомогательным количество СС в БД, принадлежащим соответствующему интервалу концентраций ЛЭ.

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.

На основе предложенной математической методики разработана система автоматизированного проектирования литейных никелевых СС, 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 прогнозистические 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.

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.

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».

Для изготовления заготовок сплава «Нейростом» применялись стандартные шихтовые материалы, используемые при производстве никельсодержащих сплавов. Выплавка заготовок производилась в вакуумной индукционной печи УППФ-3М с электрокорундовым тиглем. Химический состав разработанного и серийного сплава приведен в таблице 1.

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

Сплав	Содержание ЛЭ, вес.														
	Cr	Mo	W	C	Al	Ta	Nb	B	Cu	Ce	Fe	Si	Mn	S	P
Нейростом	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
Медар-сервис	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

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, коэффициент термического расширения, коррозионная стойкость.

Определение критических температур сплавов «Нейростом» и «Медар-сервис» проводили по кривым охлаждения расплавленного металла в тигле плавильной печи. Результаты измерений показали, что сплаву «Ней-

ростом» соответствуют более низкие значения температур ликвидус и солидус, а также меньшая ширина интервала кристаллизации, чем у сплава «Медар-сервис».

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 Купцова-Нехендзи). Проба позволяет одновременно определить жидкотекучесть, степень поражения трещинами, объем усадочных пороков и литейную усадку. Оболочковые формы пробы изготавливали по выплавляемым моделям.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗУБОПРОТЕЗНЫХ ЗАГОТОВОК

Сравнительное исследование жидкотекучести также проводили на специализированной пробе согласно ГОСТ Р 51767-2001. Количественной мерой жидкотекучести по ГОСТ Р 51767-2001 служит высота канала с сечением в виде усеченного треугольника. Данный показатель измерялся посредством оптической измерительной системы ATOS II XL, с помощью программного комплекса Geomagic Qualify.

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 (рисунок 2), что делает сплав «Нейростом» более пластичным и менее склонным к преждевременному разрушению.



а



б

Рисунок 2 – Микроструктура сплавов «Нейростом» (а) и «Медар-сервис» (б) (×100)

Сопоставление литейных никелевых СС «Нейростом» и «Медар-сервис» показывает, что разработанный литейный никелевый СС обладает более оптимальным набором свойств. «Нейростом» имеет высокие прочно-

стные характеристики в сочетании с достаточной пластичностью, что достигается путем введения в сплав вольфрама, тантала и inclusion ниобия.

Вольфрам входит в состав γ -твердого раствора и γ' -фазы и повышает прочностные характеристики, а в случае отсутствия Nb повышает и пластические свойства литейных никелевых СС.

Тантал является γ' -образующим элементом и стабилизирует выделение упрочняющей γ' -фазы, что повышает прочностные свойства разработанного литейного никелевого СС.

Снижение содержания молибдена и кремния гарантирует повышение пластичности «Нейростом».

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

Помимо этого, для оптимального значения КТР и твердости в разработанном сплаве повышено содержание углерода.

В отличие от «Медар-сервис», «Нейростом» имеет более высокую концентрацию церия, что помогает наиболее эффективно устранить вредное влияние серы и позволяет повысить прочностные свойства сплава.

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

Введение бора и снижение содержания кремния также повышает коррозионную стойкость сплава «Нейростом». Это позволяет снизить термодинамическую активность углерода и улучшить морфологию карбидов, которые снижают стабильность γ -твердого раствора и инициируют образование карбидов типа Me_{23}C_6 на границах зерен.

Исследование литейных свойств сплава «Нейростом» и «Медар-сервис» показало, что разработанный сплав обладает более узким интервалом кристаллизации, высокой жидкотекучестью как по комплексной пробе, так и по специализированной и низкой литейной усадкой.

Повышение жидкотекучести и снижение

литейной усадки разработанного сплава достигается путем введения в сплав тантала, который, помимо этого, сужает интервал кристаллизации, улучшает смачиваемость формы. Повышение содержания церия, который также гарантирует повышение литейных свойств сплава, а снижение концентрации кремния, позволяет несколько снизить литейную усадку. Вольфрам повышает температуру солидуса, тем самым сужает интервал кристаллизации. Это приводит к уменьшению разветвленности дендритов, понижает температуру нулевой жидкотекучести и улучшает жидкотекучесть.

Сплав «Нейростом» обладает большей трещиноустойчивостью, чем сплав «Медар-сервис». Это можно объяснить тем, что сплав «Нейростом» имеет большую пластичность и меньшую величину литейной усадки, чем сплав «Медар-сервис».

Понижение склонности к образованию усадочных пороков сплава «Нейростом» можно объяснить уменьшением разветвленности дендритов, что способствует улучшению питания микрообъемов отливок и уменьшает склонность к усадочной пористости.

Исследования микроструктуры показали, что при одинаковых параметрах техноло-

гического 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.

Таким образом, исследования проведенные в лабораторных условиях, позволяют дать следующие рекомендации:

1. Здоровые отливки образцов из сплава «Нейростом» могут быть получены без заметных литейных дефектов методом литья по выплавляемым моделям.

2. Для получения бездефектных литых образцов с установленными при исследовании свойствами могут быть рекомендованы температуры заливки сплава 1410–1440 °С.

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

На состав сплава «Нейростом» получен патент РФ № 2284363.