

А. А. Ганеев, Е. Ф. Шайхутдинова

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Рассматривается одна из проблем ортопедической стоматологии – разработка литейных никелевых стоматологических сплавов. Предлагаемый научный подход позволяет разработать литейный никелевый стоматологический сплав с оптимальным комплексом 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. *Синтез сплавов; литейные никелевые стоматологические сплавы; математическая модель; интеллектуальный метод; экспериментальные исследования; физико-механические и литейные свойства*

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), так как это наиболее технологичный материал, не вызывающий отрицательных реакций организма [1]. 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 [1].

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 и в условиях рыночной экономики необходима разработка и применение более экономных методик разработки новых сплавов. Наряду с традиционными методами, необходимым инструментом становятся формальные методы компьютерного проектирования.

Разработка и развитие формальных методов прогнозирования свойств СС, опирающихся на использование методов классического металлостроения 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.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка базы данных (БД) по современным литейным никелевым СС;
- разработка метода восстановления недостающей информации в БД о свойствах литейных никелевых СС;
- разработка методики оценки оптимальных диапазонов концентраций легирующих элементов (ЛЭ) в литейных никелевых СС на основе обобщения статистической информации из БД;
- разработка математической модели влияния ЛЭ на наиболее значимое физико-механическое свойство (предел текучести) литейных никелевых СС и программная реализация алгоритмов данного расчета;
- разработка алгоритмов и программная реализация проектных процедур, связанных с определением концентраций ЛЭ, обеспечивающих максимум предела текучести литейных никелевых СС;

- разработка системы автоматизированного проектирования литейных никелевых СС;
- экспериментальная оценка эффективности разработанной методики компьютерного проектирования 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 с помощью ИНС представлена на рис. 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 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].

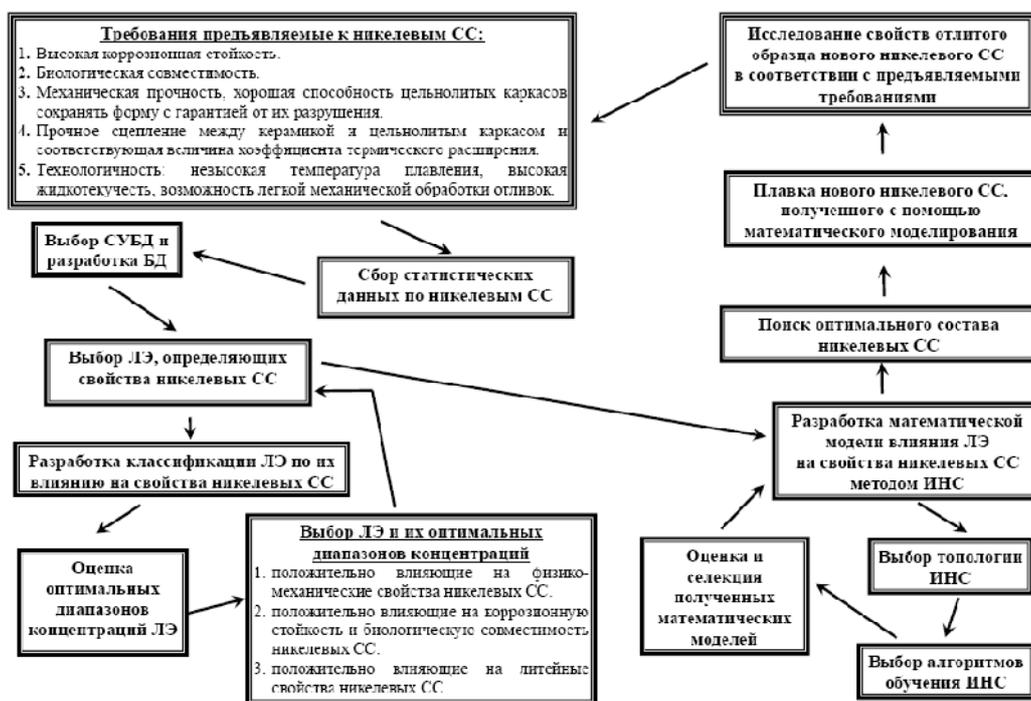


Рис. 1. Схема методики синтеза литейных никелевых стоматологических сплавов

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, так как описанные в литературе классификации не позволяли однозначно определить влияние элемента на то или иное свойство [4]. Были выделены 3 группы ЛЭ:

- положительно влияющие на физико-механические свойства – элементы IIА-VIIА подгруппы, и некоторые элементы VIIIА и III-IVB подгруппы;
- положительно влияющие на коррозионную стойкость и биосовместимость – элементы IIIА-VIIIА подгруппы и некоторые элементы IIА, IVB-IVB подгруппы;
- положительно влияющие на литейные свойства – элементы IIА-IIIА, IVB подгруппы и некоторые элементы IVA, VA, VIIIА, IIВ-VB подгруппы.

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 (табл. 1).

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. Общий вид построенных математических моделей имеет вид (1).

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 (2).

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

Таблица 1

Оптимальные концентрации ЛЭ в литейных никелевых СС, %

Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	B	C	P3M	Si	Mn	Fe
15	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,143	0	0
25,09	1,91	10,57	1,48	1,452	0,520	1,568	0,685	0,02	0,139	0,472	1,5	1,116	1,0

Таблица 2

Расчетный состав разработанного литейного никелевого СС «Нейростом, вес. %

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

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Синдром}_{(вх_1)(1)} = \\
 = \text{Сигмоида}_1 \left( \begin{array}{l} \beta_{(вх_1)(1)}^{(0)} + \beta_{(вх_1)(1)}^{(1)} x_1 + \\ + \beta_{(вх_1)(1)}^{(2)} x_2 + \dots + \beta_{(вх_1)(1)}^{(k)} x_k \end{array} \right) \\
 \dots \\
 \text{Синдром}_{(вх_k)(n_1)} = \\
 = \text{Сигмоида}_1 \left( \begin{array}{l} \beta_{(вх_k)(n_1)}^{(0)} + \beta_{(вх_k)(n_1)}^{(1)} x_1 + \\ + \beta_{(вх_k)(n_1)}^{(2)} x_2 + \dots + \beta_{(вх_k)(n_1)}^{(k)} x_k \end{array} \right) \\
 \dots \\
 \text{Синдром}_{11} = \\
 = \text{Сигмоида}_2 \left( \begin{array}{l} \beta_{11}^{(0)} + \beta_{11}^{(1)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_1)(1)} + \\ + \beta_{11}^{(2)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_1)(1)} + \dots + \\ + \beta_{11}^{(n_1)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_1)(1)} \end{array} \right) \\
 \dots \\
 \text{Синдром}_{(n_1)(n_2)} = \\
 \text{Сигмоида}_2 \left( \begin{array}{l} \beta_{(n_1)(n_2)}^{(0)} + \beta_{(n_1)(n_2)}^{(1)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_k)(n_1)} + \\ + \beta_{(n_1)(n_2)}^{(2)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_k)(n_1)} + \dots + \\ + \beta_{(n_1)(n_2)}^{(n_1)} \cdot \text{Синдром}_{(вх_k)(n_1)} \end{array} \right)
 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Синдром}_{11} = \\
 & = \text{Сигмоида}_i \left( \begin{array}{l} \beta_{11}^{(0)} + \beta_{11}^{(1)} \cdot \text{Синдром}_{11} + \\ + \beta_{11}^{(2)} \cdot \text{Синдром}_{11} + \dots + \beta_{11}^{(n_1-1)} \cdot \text{Синдром}_{11} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Синдром}_{(n_{i-1})(n_i)} = \\
 & = \text{Сигмоида}_i \left( \begin{array}{l} \beta_{(n_{i-1})(n_i)}^{(0)} + \beta_{(n_{i-1})(n_i)}^{(1)} \cdot \text{Синдром}_{(n_{i-1})(n_i)} + \\ + \beta_{(n_{i-1})(n_i)}^{(2)} \cdot \text{Синдром}_{(n_{i-1})(n_i)} + \dots + \\ + \beta_{(n_{i-1})(n_i)}^{(n_{i-1})} \cdot \text{Синдром}_{(n_{i-1})(n_i)} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\sigma}_{0,2} = \beta_{(n_i)(вых)}^{(0)} + \beta_{(n_i)(вых)}^{(1)} \cdot \text{Синдром}_{11} + \\
 & + \beta_{(n_i)(вых)}^{(2)} \cdot \text{Синдром}_{12} + \dots + \beta_{(n_i)(вых)}^{(n_i)} \cdot \text{Синдром}_{(n_{i-1})(n_i)}, \\
 & \sigma_{0,2} = \frac{\tilde{\sigma}_{0,2} [(\sigma_{0,2})_{\max} - (\sigma_{0,2})_{\min}] + [(\sigma_{0,2})_{\max} + (\sigma_{0,2})_{\min}]}{2},
 \end{aligned}$$

где  $\beta$  – коэффициент уравнения;  $i$  – номер скрытого внутреннего слоя обучаемой ИНС;  $n_i$  – номер нейрона в  $i$ -м скрытом слое;  $k$  – номер входного нейрона;  $\tilde{\sigma}_{0,2}$  – кодированное расчетное значение предела текучести;  $\sigma_{0,2}$  – расчетное значение предела текучести;  $(\sigma_{0,2})$  – фактическое значение предела текучести; Синдром $_{n_{i-1}n_i}$  – сигнал с  $n_{i-1}$  нейрона на  $n_i$  нейрон.

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

$$\begin{aligned}
 & \text{Синдром}_{21} = \text{Сигмоида}_2 \left( \begin{array}{l} -0,371 \cdot \text{Синдром}_{11} + \\ + 0,999 \cdot \text{Синдром}_{12} - \\ - 0,708 \cdot \text{Синдром}_{13} + 0,130 \end{array} \right) \\
 & \text{Синдром}_{22} = \text{Сигмоида}_2 \left( \begin{array}{l} -0,177 \cdot \text{Синдром}_{11} + \\ + 0,419 \cdot \text{Синдром}_{12} - \\ - 0,676 \cdot \text{Синдром}_{13} - 0,482 \end{array} \right) \\
 & \tilde{\sigma}_{0,2} = 0,999 \cdot \text{Синдром}_{21} - 0,917 \cdot \text{Синдром}_{22} - 0,738 \\
 & \sigma_{0,2} = \frac{903 \cdot \tilde{\sigma}_{0,2} + 1121}{2}
 \end{aligned}$$

Разработанный с помощью методов математического моделирования расчетный состав сплава «Нейростом» исследовался на физико-механические, коррозионные и литейные свойства. 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. Выплавку заготовок производили в вакуумной индукционной печи УППФ-3М с электрокорундовым тиглем. Химический состав разработанного и серийного сплава приведен в табл. 3.

Таблица 3

**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 растяжения, 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 °С до 600 °С. 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 (Приложение А) 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 табл. 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 разработанного и серийного никелевых СС**

Сплав	Критические температуры, °С		Интервал кристаллизации, °С
	$T_L$	$T_S$	
«Нейростом»	1334	1298	36
«Медар-сервис»	1351	1303	48

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. Оболочковые формы пробы изготавливали по выплавляемым моделям.

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. Условно-истинная жидкотекучесть  $\lambda$  для сплава «Нейростом» составляет 376 мм, против жидкотекучести для сплава «Медар-сервис» с соответственно – 369 мм.

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. Сумма длина трещин сплава для сплава «Нейрос-

том» составляет 2,66 мм, против данного показателя для сплава «Медар-сервис» – 3,11 мм.

Определение усадочных пороков производили на конусном образце сплава, получаемом в воронке пробы. Суммарный объем усадочных пороков для сплава «Нейростом» составляет 4,34%, против данного показателя для сплава «Медар-сервис» – 4,37%.

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. Наибольшей жидкотекучестью обладали те сплавы, которые наиболее точно воспроизвели размер – параметр  $h$ .

Жидкотекучесть сплава «Нейростом» по параметру  $h_{\text{сплава}}$  составляет 1,95 мм, против жидкотекучести сплава «Медар-сервис» с соответственно – 1,91 мм.

Сравнительное исследование литейной усадки проводили согласно ГОСТ Р 51767-2001. Относительная величина литейной усадки для сплава «Нейростом» составляет 2,13%, против соответственно 2,17% для сплава «Медар-сервис».

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

Исследование микроструктуры показало, 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 (рис. 2), что делает сплав «Нейростом» более пластичным и менее склонным к преждевременному разрушению.

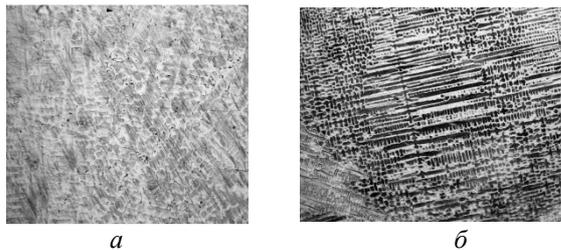


Рис. 2. Микроструктура сплавов ( $\times 100$ ):  
а – «Нейростом», б – «Медар-сервис»

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 легирующих элементов.

Сопоставление литейных никелевых СС «Нейростом» и «Медар-сервис» показывает, что разработанный литейный никелевый СС обладает более оптимальным набором свойств. «Нейростом» имеет высокие прочностные характеристики в сочетании с достаточной пластичностью, что достигается путем введения в сплав вольфрама, тантала и исключением ниобия.

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

Тантал является  $\gamma'$ -образующим элементом и стабилизирует выделение упрочняющей  $\gamma'$ -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  $\gamma$ -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 и 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 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  $\gamma$ -твердого раствора и устраняющих вредное влияние примесей, а также характеризующихся меньшей шириной интервала кристаллизации.

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

- здоровые отливки образцов из сплава «Нейростом» могут быть получены без замет-

ных литейных дефектов методом литья по выплавляемым моделям;

- для получения бездефектных литых образцов с установленными при исследовании свойствами может быть рекомендован температурный интервал заливки сплава 1410...1440 °С;

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

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

## 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.
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.

## ОБ АВТОРАХ

**Ганеев Альмир Амирович**, проф. каф. машин и технол. литейн. производства. Дипл. инженер по металлургии цветн. металлов (УПИ, 1963). Д-р техн. наук по металловед. и литейн. производству (УрГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2000). Иссл. в обл. металловедения и синтеза жаропрочн. сплавов.

**Шайхутдинова Евгения Флюоровна**, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по литейн. производству (ЮУрГУ, Челябинск, 2011) Иссл. в обл. металловедения и синтеза жаропрочн. сплавов.