

УДК 531/534: [57+61]

РАЦИОНАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТНОГО ФИКСАТОРА В СЪЁМНОМ ЗУБОЧЕЛЮСТНОМ ПРОТЕЗЕ

В.Н. Анциферов¹, Г.И. Рогожников², Г.Н. Вотинов³, Н.Б. Асташина²

¹ Научный центр порошкового материаловедения Пермского государственного технического университета, Россия, 614000, ул. Профессора Поздеева, 6

² Кафедра ортопедической стоматологии Пермской государственной медицинской академии им. академика Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Куйбышева, 39

³ Кафедра общей физики Пермского государственного технического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vgn@pstu.ru

Аннотация. Предложена рациональная конструкция магнитного фиксатора в съёмном зубочелюстном протезе, использующая замкнутый магнитный контур. Решены прямая и обратная задачи оптимизации количества магнитных контуров на единицу длины. Получена универсальная аналитическая зависимость силы взаимодействия самарий-кобальтового магнита с ферромагнетиком. Уникальность данного соотношения состоит в том, что оно справедливо для самарий-кобальтового магнита цилиндрической формы произвольного объёма, причём сечение магнита может быть как круглым, так и овальным, квадратным и др., что немаловажно при выборе ортопедической конструкции в различных клинических ситуациях.

Ключевые слова: съёмный зубочелюстной протез, замкнутый магнитный контур, магнитный фиксатор, самарий-кобальтовый магнит.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы фиксации и стабилизации съёмных зубочелюстных протезов обуславливает необходимость разработки конструкции магнитного фиксатора, оптимального в смысле простоты использования, биологической совместимости и эстетики [4, 5, 13].

Обзор многочисленных работ [1, 2, 6–12] позволяет сделать вывод о том, что использование замкнутого магнитного контура оправданно не только из-за снижения эффекта размагничивания постоянных магнитов, но и в силу локализации магнитного поля и снижения влияния последнего на живую ткань [8–12].

Учеными Пермского государственного технического университета и Пермской государственной медицинской академии, коллективом авторов (академика В.Н. Анциферова, профессора Г.И. Рогожникова, профессора Ф.И. Кислых, профессора А.И. Цаплина, доцента Н.Б. Асташиной, доцента Г.Н. Вотинова, к.м.н. С.И. Рапекта, к.м.н. С.В. Казакова, к.м.н. А.А. Сметкина) разработано устройство для магнитной фиксации съёмных зубочелюстных протезов (полезная модель №74064 от 20.06.2008). Предлагаемое устройство (рис. 1) состоит из зубочелюстного протеза 1, в базис которого введен самарий-кобальтовый магнитный элемент 2 с магнитопроводом из ферромагнетика 3 и челюстного имплантата 4, выполненного из углеродного материала «Углекон - М», с зафиксированным в нем ферромагнитным компонентом квадратного сечения 5, через который магнитная цепь замыкается. Имплантат закрывается тонким

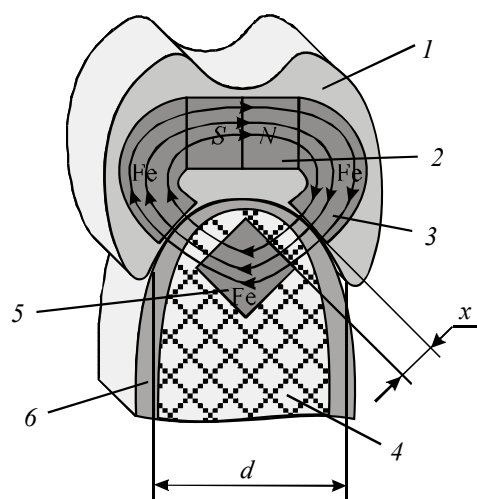


Рис. 1. Модель магнитного фиксатора: 1 – зубочелюстной протез; 2 – самарий-кобальтовый магнит; 3 – магнитопровод; 4 – челюстной имплантат; 5 – ферромагнетик; 6 – слизистая оболочка; x – расстояние между ферромагнетиками; d – эффективная ширина области контакта

слоем слизистой оболочки 6. Силовое взаимодействие между ферромагнетиками 3 и 5, находящимися на расстоянии x , должно обеспечивать надёжную фиксацию и стабилизацию ортопедической конструкции 1.

Магнитный элемент 2 имеет форму цилиндра и может быть расположен в любой точке магнитопровода 3, однако близкое размещение к ферромагнетикам 5 затруднено из-за нарушения требования комфортности пациента, трудности закрепления и последующей коррекции (например, замены при размагничивании).

Предполагается, что данное устройство позволит надёжно удерживать зубочелюстной протез при различных воздействиях функциональной нагрузки. Обоснованность предположений авторов будет проверена во время проведения экспериментальных и клинико-лабораторных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА С ФЕРРОМАГНЕТИКОМ

Трудности теоретического прогнозирования силы взаимодействия постоянных магнитов с ферромагнетиками обусловили проведение натурального эксперимента. Лабораторные испытания проведены в лаборатории №1 Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук на установке 1925 ПА10 М (рис. 2). Эксперимент проводился для двух самарий-кобальтовых магнитов круглого сечения, отличающихся диаметрами сечения. Длина магнитных элементов $l = 5$ мм; диаметр магнита № 1 $d_1 = 5$ мм; диаметр магнита № 2 $d_2 = 3,5$ мм. Объёмы: $V_1 = 98$ мм³, $V_2 = 48$ мм³.

Для чистоты эксперимента образцы приклеивались к парамагнитным подложкам (рис. 3), уменьшая влияние окружающих ферромагнетиков.

Сила взаимодействия магнита с ферромагнетиком прямо пропорциональна величине магнитной индукции B_0 вблизи полюсов магнита и имеет некоторую зависимость от расстояния $f(x)$, определяемую экспериментально.

Магнитная индукция B_0 вблизи полюсов магнита прямо пропорциональна величине намагниченности J и объёму магнита V :

$$F \sim B_0 f(x) \sim JV f(x).$$



Рис. 2. Лабораторная установка

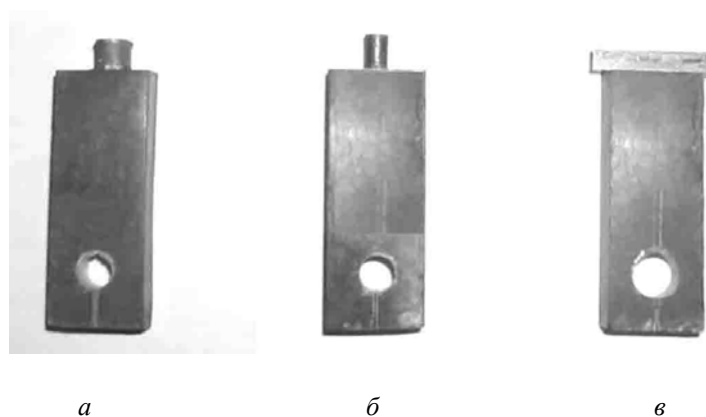


Рис. 3. Образцы на парамагнитной подложке: *а, б* – самарий-кобальтовые магниты, диаметры сечений 5 и 3,5 мм соответственно; *в* – имплантированный ферромагнетик

В случае если исходные самарий-кобальтовые магниты намагничены до насыщения, остаточная намагниченность у них также будет одинаковой (и являться их характеристикой). Таким образом, сила взаимодействия магнита с ферромагнетиком прямо пропорциональна объёму магнита и зависит от расстояния

$$F \sim V f(x). \quad (1)$$

В результате эксперимента по растяжению системы магнит–ферромагнетик самописец установки выдавал непрерывный график зависимости силы их взаимодействия от расстояния (рис. 4). Приборная погрешность 0,01 Н.

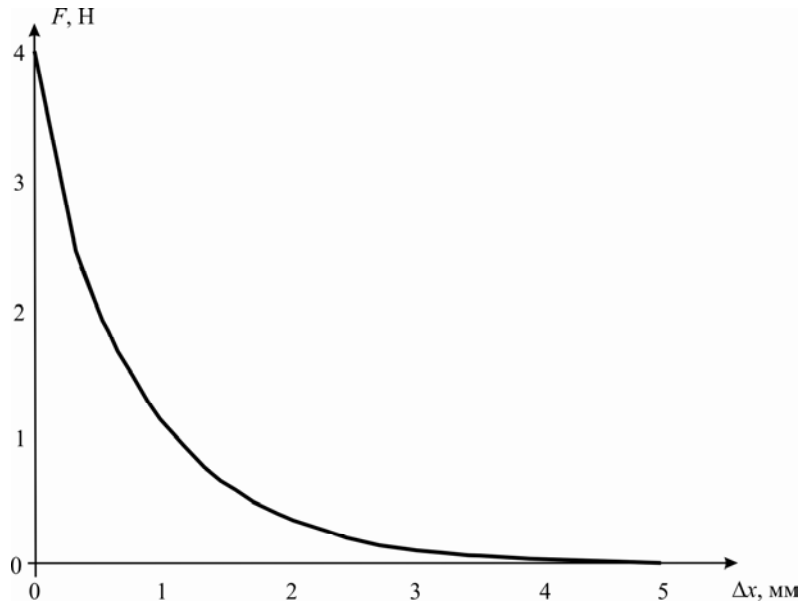


Рис. 4. Экспериментальный график зависимости силы взаимодействия самарий-кобальтового магнита с ферромагнетиком от расстояния между ними (магнит № 1)

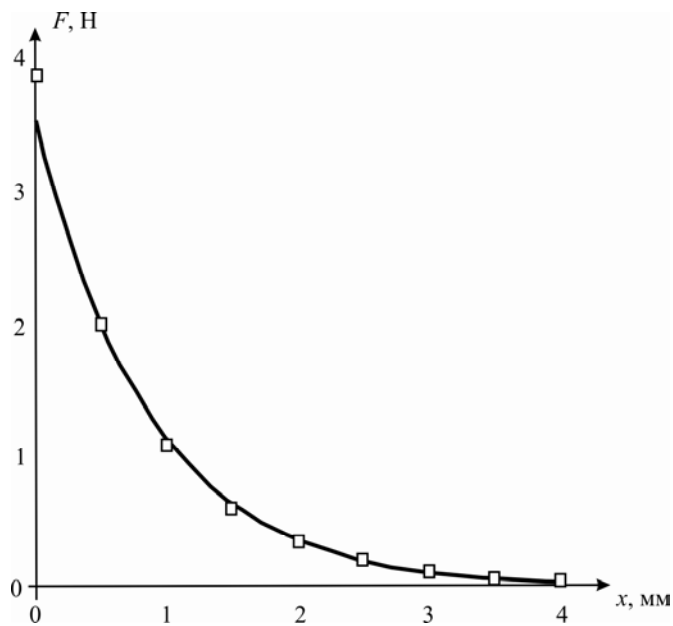


Рис. 5. Аналитический график зависимости (сплошная линия) и экспериментальные точки для магнита № 1

Таблица 1

x , мм	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$F(x)$, Н	3,9	2,0	1,08	0,6	0,34	0,2	0,12	0,06	0,04

Легко видеть, что данная зависимость имеет экспоненциально убывающий характер и в первом приближении с учетом соотношения (1) аналитически её можно описать функцией вида

$$F(x) = AV e^{-kx}, \quad (2)$$

где V – объём образца, A и k – некоторые постоянные коэффициенты.

Для магнита № 1 снятые численные значения зависимости силы взаимодействия от расстояния (для $N = 9$ значений) приведены в табл. 1.

Коэффициенты A и k определяются с помощью метода наименьших квадратов. Прологарифмировав соотношение (2), учтя, что $V = V_1$ и введя обозначения

$$y = \ln F, \quad a = \ln(AV_1),$$

приходим к линейной зависимости

$$y = a - kx.$$

Согласно методу наименьших квадратов следующая функция двух переменных должна стремиться к минимуму,

$$f(a, k) = \sum_{i=1}^N (y_i - y(x_i))^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a + kx_i)^2 \rightarrow \min.$$

Следовательно,

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - a + kx_i) = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial k} = 2 \sum_{i=1}^N (x_i (y_i - a + kx_i)) = 0. \end{cases}$$

Приходим к системе линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} aN - k \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i; \\ a \sum_{i=1}^N x_i - k \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i y_i, \end{cases}$$

решив которую, находим

$$a = 1,264 = \ln(AV_1); \quad k = 1,144; \quad A = \exp(a)/V_1 = 0,0361.$$

Получаем аналитическую зависимость силы взаимодействия используемого постоянного магнита с ферромагнетиком как функцию расстояния между ними,

$$F(x) = 0,0361 V e^{-1,144x}, \quad (3)$$

где сила F измеряется в Ньютонах, объём V – в мм³, расстояние x – в мм.

График данной зависимости с нанесёнными экспериментальными точками (см. табл. 1) для магнита № 1 ($V_1 = 98$ мм³) приведён на рис. 5, откуда видно совпадение численных значений силы в практически интересующем диапазоне расстояний (от 1 мм до 4 мм).

Соотношение (3) даёт удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными и для магнита № 2 ($V_2 = 48$ мм³).

Таким образом, силу взаимодействия произвольного самарий-кобальтового магнита с ферромагнетиком можно оценить с помощью аналитической зависимости

(3). Уникальность данного соотношения состоит в том, что оно справедливо для самарий-кобальтового магнита цилиндрической формы произвольного объёма V , причём сечение магнита может быть как круглым, так и овальным, квадратным и др., что немаловажно при учёте особенностей пациентов.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ФИКСАТОРА

1. Исходные данные для расчёта рациональных параметров базовой модели

Комфортная сила удержания протеза (результатирующая сила) $F_{\text{рез}}$ составляет около 1,2 Н [3]. В расчёте на 12 см длины l протеза челюсти вдоль зубного ряда получаемое значение силы на единицу длины F_l составляет около 10 Н/м. В дальнейшем цифры могут быть уточнены (с учётом клинической ситуации).

Ширина области контакта протеза d составляет порядка 1 см (см. рис. 1).

Давление p (нормальное напряжение σ), оказываемое протезом при нормальном удержании,

$$p = \sigma = \frac{F}{ld} = \frac{F_l}{d} = 10^3 \text{ Па},$$

что является минимальным давлением, оказываемым протезом на живую ткань.

Относительную деформацию живой ткани ε можно оценить с использованием закона Гука

$$\sigma = E \varepsilon,$$

где E – модуль Юнга (для мягких околочелюстных тканей $E = 0,5 \text{ МН/м}^2$ [7]), $\varepsilon = \sigma / E = 2 \cdot 10^{-3}$.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x},$$

где x – расстояние между ферромагнетиками (см. рис. 1). При $x = 2 \text{ мм}$ абсолютная деформация Δx составляет $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, что можно считать незначительным (пренебречь).

2. Расчёт оптимальных параметров магнитного фиксатора

Пусть F_0 – сила взаимодействия магнита с ферромагнетиком. Протез в расчёте на один магнитный контур притягивается к имплантированному ферромагнетиком с силой (рис. 6, 7)

$$F = F_1 + F_2,$$

где $F_1 = F_2 = F_0$.

При квадратном сечении имплантированного ферромагнетика $F_1 \perp F_2$. В этом случае

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{2}F_0.$$

Результирующая сила, действующая на протез,

$$F_{\text{рез}} = kF,$$

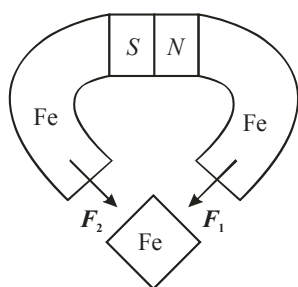


Рис. 6. Магнитный контур

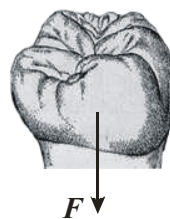


Рис. 7. F – сила, действующая на протез в расчёте на каждый магнитный контур

где k – количество замкнутых магнитных контуров, приходящееся на протез. Таким образом,

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{2k}F_0.$$

Учитывая, что $\frac{F_{\text{рез}}}{l} = F_l = 10 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, можно рассчитать количество контуров на единицу длины.

$$F_l = \frac{\sqrt{2k}F_0}{l},$$

откуда

$$k = \frac{F_l l}{\sqrt{2}F_0}. \quad (4)$$

Поскольку F_l задаётся из условий комфортности пациента, то количество контуров на единицу длины зависит практически только от силы F_0 взаимодействия ферромагнетиков, которая, в свою очередь, зависит от расстояния x между ними. На практике значения параметра x изменяется в пределах от 2 до 3 мм.

Результаты расчёта эффективного количества контуров k при $l = 5$ см длины протеза приведены в табл. 2.

Приведённые в таблице значения количества контуров (при $l = 5$ см) рассчитаны для самарий-кобальтового магнита объёмом $V_1 = 98 \text{ мм}^3$.

При необходимости может быть решена и обратная задача. Задаётся количество контуров k на длине l и эффективное расстояние между ферромагнетиками x . По формуле (4) находится значение F_0 .

$$F_0 = \frac{F_l l}{\sqrt{2} k}.$$

Далее по полученному соотношению для силы (3) находим необходимый объём магнитного элемента

$$V = \frac{F_0}{0,0361 e^{-1,144x}}.$$

При практической реализации данный объём может быть разделён между двумя магнитами, включёнными последовательно в магнитную цепь, показанную на рис. 6.

Таблица 2

x , мм	2	2,5	3
F_0 , Н	0,34	0,2	0,12
k	≈ 1	≈ 2	≈ 3

Выводы

1. Предложена рациональная конструкция магнитного фиксатора в съёмном зубочелюстном протезе, использующая замкнутый магнитный контур. Решены прямая и обратная задачи оптимизации количества магнитных контуров на единицу длины.

2. Получена универсальная аналитическая зависимость силы взаимодействия самарий-кобальтового магнита (цилиндрической формы произвольного объёма) с ферромагнетиком.

Благодарности

Публикуется при финансовой поддержке гранта Российского гуманитарного научного фонда «Разработка программы комплексной стоматологической реабилитации больных с дефектами челюстей в различных регионах Пермского края».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтман, А.Б.* Постоянные магниты / А.Б. Альтман, Э.Е. Верниковский, А.Н. Гербер. – М.: Энергия, 1980. – 486 с.
2. *Бякова, Ж.С.* Съёмные зубные протезы с магнитным устройством, покрытым титаном: дис. ... канд. мед. наук / Ж.С. Бякова. – Пермь, 1999. – 159 с.
3. *Казаков, С.В.* Ортопедическое лечение больных с дефектами челюстей. Экспериментально-клинические исследования: дис. ... канд. мед. наук / С.В. Казаков. – Пермь, 2004. – 159 с.
4. *Кислых, Ф.И.* Клинико-экспериментальное обоснование пластики дефектов нижней челюсти: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Ф.И. Кислых – М., 1996. – 48 с.
5. *Кислых, Ф.И.* Лечение больных с дефектами челюстных костей / Ф.И. Кислых, Г.И. Рогожников, М.Д. Кацнельсон, Н.Б. Асташина. – М.: Медицинская книга, 2006. – 194 с.
6. *Марков, Б.П.* Влияние имплантатов из стали и сплавов самарий-кобальта на организм крыс / Б.П. Марков, Т.П. Вавилова, В.И. Диденко // Стоматология. – 1986. – Т. 65, № 1. – С. 15–17.
7. *Марков, Б.П.* Клинико-экспериментальное обоснование применения имплантатов и постоянных магнитов при ортопедическом лечении больных с полной утратой зубов: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Б.П. Марков. – М., 1989. – 43 с.
8. *Марков, Б.П.* Магнитные фиксаторы / Б.П. Марков, Ж.С. Бякова, Г.Б. Маркова, А.Е. Ермаков, С.В. Казаков. – Пермь: Типографская книга, 2000. – 132 с.
9. *Маркова, Г.Б.* Обоснование применения внутрикорневых магнитных фиксаторов для повышения эффективности ортопедического лечения: дис. ... канд. мед. наук / Г.Б. Маркова. – М., 1998. – 198 с.
10. *Gonda, T.* Contact between magnetic attachments and keepers in overdentures during function / T. Gonda, Y. Maeda, M. Sogo // J. Dent. Res. – 1996. – Vol. 75. – Sp. Iss. SI. – P. 326.
11. *Hasegana, T.* Magnetic attachment for artificial tooth fixation used in dental diagnosis and treatment / T. Hasegana: Патент 0915 4856 Япония, 1997, А 61 С 8/00.
12. *Kiyomi, T.* Manufacture of permanent magnet structural body and magnetic attachment for fixing denture / T. Kiyomi, T. Morimichi // Патент, 100114944, Япония, 1998.
13. *Suga, Y.* Tooth root movement magnetic apparatus for e.g. orthodontics / Y. Suga: Патент 09234207 Япония, 1997, А 61 С7/00.

THE RATIONAL DESIGN OF THE MAGNET FIXATIVE IN A REMOVABLE DENTOFACIAL PROSTHESIS

V.N. Anciferov, G.I. Rogozhnikov, G.N. Votinov, N.B. Astashina (Perm, Russia)

The rational design of the magnet fixative with the closed magnetic circuit for removable dentofacial prosthesis is proposed in the article. The direct problem and the inverse problem of the optimization of the magnetic circuits number per a length unit are solved. An universal analytical dependence of a samarium–cobalt magnet and the ferromagnet interaction

force has been obtained. The uniqueness of the dependence is because of its application and validation for the cylindrical samarium–cobalt magnet of optional volume; moreover, the cross-section can be arbitrary (round, oval, square, etc.) that may be useful to take into account the features of patients.

Key words: closed magnetic circuit, magnet lock, samarium–cobalt magnet.

Получено 17 июля 2008