

05.1;05.2

Предварительно напряженные соленоиды сильных магнитных полей

© *О.Н. Коблова, Ю.Б. Кудасов*

Саровский физико-технический институт, Саров, Нижегородская обл.

E-mail: Olg470@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ, Саров

В окончательной редакции 6 апреля 2009 г.

Теоретически исследовано влияние предварительных механических напряжений, близких по своим значениям к пределу текучести материала, на прочность соленоида сильного магнитного поля. Проведен сравнительный анализ предварительно напряженных катушек различных конструкций. Разработана концепция напряженного композитного соленоида.

PACS: 07.55.Db

Сильные магнитные поля (СМП) широко используются для научных исследований в области физики твердого тела, нанотехнологий, химии катализаторов и медицины [1]. В процессе генерации СМП важную роль играют эффекты магнитного давления, так как оно достигает, а в некоторых случаях и превосходит предел текучести большинства конструкционных материалов [2,3], поэтому вопросы рационального конструирования соленоидов являются ключевыми для получения СМП.

На проводник, по которому протекает электрический ток, в магнитном поле действуют поперечные силы. Деформации, возникающие в обмотке под действием этих сил, в СМП могут стать необратимыми, что приводит к разрушению соленоида. Известно несколько способов сохранения конструкции от механического разрушения. К ним относится принцип динамического удержания: длительность импульса поля выбирается такой, чтобы материал обмотки не претерпел за это время значительной деформации [2]. Альтернативой принципу динамического удержания представляется способ, предложенный и осуществленный Дате: импульсный соленоид разбивается на секции, в каждой из которых механические напряжения не превышают предела прочности

материала и не передаются от одной секции к другой [2]. Другим способом повышения прочности соленоида служит заключение его в бандаж. Бандажи могут быть выполнены из нержавеющей стали или диэлектрических материалов (органические или неорганические нити и препреги) [4]. Еще один способ удержания соленоида состоит в создании квазибессиловой конфигурации магнитного поля, когда сочетание азимутальных и аксиальных магнитных полей приводит к уравниванию радиальных магнитных сил [5].

В настоящей работе рассматривается способ удержания соленоида СМП за счет предварительных механических напряжений. Соленоиды СМП обычно наматываются с сильным натяжением, однако в данном случае речь идет о внутренних предварительных напряжениях, соизмеримых с пределом текучести материала. Такие напряжения можно создавать, например, предварительным прогревом проволоки при намотке соленоида. Роль предварительных термических напряжений была исследована в работе [6,7]. Расчет проводился методом конечных элементов, требующим больших вычислительных ресурсов. Из-за большой длины конструкции, рассмотренной в работах [6,7], в ней приходилось учитывать трение слоев и другие эффекты длинного соленоида. Для компактных соленоидов сильных магнитных полей существуют более простые методы анализа прочности [2,8].

Расчет механических напряжений в соленоиде ведется в два этапа. Сначала вычисляется пондеромоторная сила. Для этого необходимо знать распределение магнитного поля и плотность тока, которая предполагается в данной работе однородной. Затем методами теории упругости по известным силам определяются механические напряжения.

Существует несколько методов расчета аксиальной и радиальной составляющих магнитного поля в круглых цилиндрических катушках прямоугольного поперечного сечения с постоянной плотностью тока. В данной работе мы использовали метод суперпозиции как наиболее удобный для осесимметричных систем [9]. Далее, зная пондеромоторные силы, можно вычислить механические напряжения, возникающие в соленоиде. Расчет производится при помощи уравнений теории упругости (см. [8,10]). С учетом того, что касательные напряжения и азимутальная составляющая объемной силы в соленоиде равны нулю, можно переписать полную систему уравнений упругости в следующем

виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= -q_z, \\ \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} &= -q_r,\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_z — аксиальное напряжение, σ_t — тангенциальное напряжение, σ_r — радиальное растягивающее напряжение, q_z , q_r — проекция объемной силы на соответствующие направления. Проинтегрировав первое из уравнений, находим аксиальное напряжение, возникающее в соленоиде.

Хорошо известно, что для оценки предельного магнитного поля соленоида достаточно рассмотреть тангенциальные напряжения в центральном сечении соленоида, так как здесь они принимают свои максимальные значения и значительно превышают аксиальные радиальные напряжения [8]. Значения σ_t и σ_r мы получаем, решая второе уравнение системы (1), используя систему уравнения Ляме [10].

Уравнение Ляме позволяет вычислить радиальное перемещение. Далее находим относительные удлинения и, используя закон Гука [10], находим σ_r , σ_t , содержащие константы, которые определяются граничными условиями

$$\begin{aligned}\sigma_r(r = a_1) &= -P_i, \\ \sigma_t(r = a_2) &= P_0,\end{aligned}\quad (2)$$

где a_1 — внутренний радиус соленоида, a_2 — внешний радиус соленоида, P_i , P_0 — давление соответственно на внутреннюю и внешнюю поверхности катушки в центральном сечении. Если соленоид укреплен бандажом, то P_i считается из условия равенства перемещения соленоида и бандажка. Методика расчета предварительно калибровалась по известным результатам в импульсных соленоидах 50 Т диапазона [2,3]. Показано, что она хорошо воспроизводит экспериментальные результаты.

Для проведения сравнительного анализа влияния предварительных механических напряжений мы рассматривали несколько вариантов импульсных неразрушаемых соленоидов СМП. Во всех случаях рассматривалась круглая катушка с прямоугольным осевым сечением с внутренним радиусом $R_1 = 0.01$ м, внешним радиусом $R_2 = 0.04$ м,

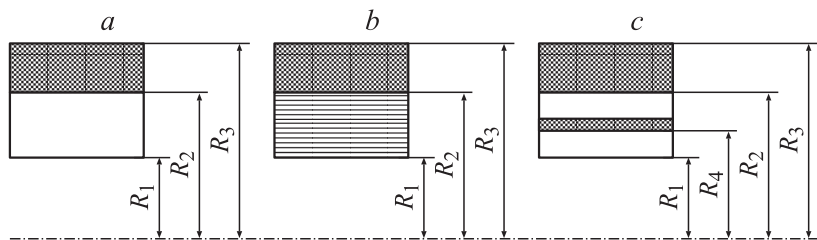


Рис. 1. Конструкции соленоидов. Серым цветом отмечены бандажирующие слои.

радиусом бандажа $R_3 = 0.07$ м и длиной $l = 0.08$ м. В качестве материала токонесущего слоя использовался микрокомпозитный провод ВНИИНМ Cu–Nb: с пределом прочности $\sigma_{BM} = 1.1$ ГПа, модулем Юнга $E_M = 110$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0.34$. В качестве материала бандажа было выбрано высокопрочное высокомодульное полиимидное волокно ИВСАН-89 [4]: с пределом прочности $\sigma_{BV} = 3.2$ ГПа и модулем Юнга $E_B = 225$ ГПа.

Мы рассматривали несколько вариантов соленоидов с различными видами начальных напряжений материалов бандажа и токонесущего слоя (рис. 1). Геометрические размеры не оптимизировались для получения максимального значения магнитного поля, поскольку основной задачей было проведение сравнительного анализа различных напряженных конструкций соленоида.

Первым из рассмотренных вариантов был соленоид прямоугольного сечения с ненапряженным токонесущим слоем и бандажом (рис. 1, *a*). В результате расчетов максимальное магнитное поле, которое способен выдержать соленоид без разрушения, оказалось равным 42 Т (тангенциальные механические напряжения меньше предела текучести).

Для того же соленоида, но с токонесущим слоем, имеющим начальное напряжение, близкое к пределу текучести материала, максимальное магнитное поле составило 61 Т. Предварительное напряжение в расчетах задавалось функцией вида A/r , где A — константа, которая определяется из начальных условий так, чтобы предварительное напряжение не превышало предела текучести материала. Бандаж находился в растянутом, а токонесущий слой — в сжатом состоянии. Из графиков рис. 2 видно, что предварительное сжатие токонесущего слоя

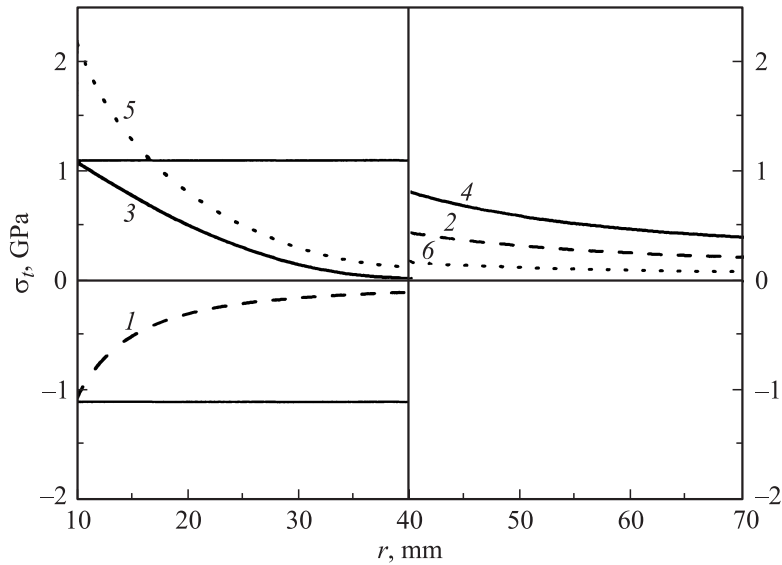


Рис. 2. Зависимости тангенциального напряжения от радиуса в центральном сечении соленоида: 1, 2 — предварительное напряжение токонесущей части и бандажа соответственно; 3, 4 — тангенциальное напряжение при магнитном поле 61 Т токонесущей части и бандажа соответственно; 5, 6 — напряжение в токонесущей части и бандаже ненапряженного соленоида при 61 Т. Горизонтальные линии соответствуют пределу прочности проводника.

способствует более равномерному распределению тангенциального напряжения в максимуме магнитного поля, что и приводит к увеличению пикового значения поля. При одном и том же значении магнитного поля максимальное тангенциальное напряжение на внутренней границе в предварительно напряженном соленоиде оказывается примерно в два раза меньше.

В варианте, показанном на рис. 1, *b*, соленоид состоит из тонких чередующихся токопроводящих и бандажирующих слоев. Причем пары слоев предварительно напряжены: бандажирующий слой растянут, а токопроводящий — сжат. Для расчета механических характеристик такого соленоида удобно рассматривать его как композит. Для ком-

позитного материала эффективный предел прочности, модуль Юнга и коэффициент Пуассона могут быть рассчитаны как [11]:

$$\begin{aligned} E &= E_B \psi + (1 - \psi) E_M, \\ \mu &= \mu_{BB} \psi + \mu_{BM} (1 - \psi), \\ \sigma_B &= \sigma'_{BB} \psi + \sigma'_{BM} (1 - \psi), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma'_{BM} = \sigma_{BM} - \sigma_M^0$, $\sigma'_{BB} = \sigma_{BB} - \sigma_B^0$, ψ — объемная доля бандажа, σ_M^0 и σ_B^0 — предварительные напряжения в токонесущем слое и в слое бандажа. Следует учесть, что токонесущий слой предварительно сжат ($\sigma_M^0 < 0$), бандаж — растянут ($\sigma_B^0 > 0$). Вся конструкция в целом подвергается растяжению под действием магнитного поля. Для тонких слоев мы пренебрегли радиальной зависимостью тангенциального напряжения в слое. Предварительные напряжения определяются условиями равновесия пары слоев в отсутствие магнитного поля и ограничены пределами прочности токонесущего слоя и бандажа.

Предел прочности композита достигается, когда напряжения в токонесущем слое или в бандаже достигнут соответствующих пределов прочности. Из выражений (3) видно, что повышение прочности предварительно напряженного композита происходит за счет асимметрии: предел прочности на растяжение повышается, а на сжатие, наоборот, снижается. Следует отметить, что удлинение при разрыве материала бандажа должно быть больше, чем проволоки. Мы провели расчет тангенциальных напряжений в соленоиде, геометрические параметры которого указаны выше. Максимальное магнитное поле в таком соленоиде составляет 69 Т при $\psi = 0.1$ и 72 Т при $\psi = 0.2$.

Известно, что промежуточный бандаж внутри токопроводящего слоя улучшает характеристики соленоидов [4] (рис. 1, с). Мы рассмотрели напряженный соленоид с промежуточным бандажом толщиной 5 мм на радиусе $R_4 = 0.02$ м. Предварительные напряжения в токонесущем слое и бандаже выбирались в форме A/r . Максимальное магнитное поле, которое достигается в таком предварительно напряженном соленоиде, 69 Т.

В заключение мы рассмотрели несколько вариантов бандажированных предварительно напряженных соленоидов с одинаковыми геометрическими параметрами. Показано, что предварительное напряжение токонесущей части позволяет значительно увеличить пиковое магнитное

поле. Наиболее эффективны переменные по сечению предварительные напряжения: внутренние слои сжаты, внешние — растянуты. Повышает пиковое магнитное поле также чередование тонких проводящих и бандажирующих слоев с предварительным напряжением (напряженный композитный соленоид). Здесь следует иметь в виду, что в этом случае несколько снижается объем токонесущего материала, поэтому данная конструкция приводит к увеличению джоулевого разогрева соленоида. Кроме того, создание соленоида из пар тонких слоев проводника и бандаж с предварительным взаимным напряжением является сложной технологической задачей.

Список литературы

- [1] *Boebinger G.S., Lacerda A.H., Schneider-Muntau H.J., Sullivan N.* // *Physica* B. 2004. V. 294–295. P. 512.
- [2] *Лагутин А.С., Ожогин В.И.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [3] *Лагутин А.С., Ожогин В.И.* // ПТЭ. 1981. № 3. С. 195–197.
- [4] *Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжисева В.Г., Берлин А.А.* // *Рос. хим. ж.* 2001. Т. XLV. С. 56.
- [5] *Shneerson G.A., Amromin E.L., Khoziko V.Y., Borovkov A.I.* // *Proceedings of the VIII International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* / Eds H.J. Schneider-Muntau. World Scientific Publishing Co., 2004. P. 99.
- [6] *Michael P., Vieira R., Jayakumar R., Kato T., Nakajima H., Gugimoto M.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2001. V. 11. P. 1877–1880.
- [7] *Fu Y., Jong C., Michael P., Mitchell N.* // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2006. V. 16.
- [8] *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Магнитные и механические свойства конструкций изобycznych и сверхпроводящих материалов. М.: Мир, 1971.
- [9] *Алиевский Б.Л., Орлов В.Л.* Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- [10] *Александров А.Я., Соловьев Ю.И.* Пространственные задачи теории упругости, применение методов теории функции комплексного переменного. М.: Наука, 1978.
- [11] *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композитных материалов. М.: Машиностроение, 1984.