

Ленточный супермаховик – настоящее и перспективы

Супермаховик – это маховик высокой удельной энергоемкости, изготовленный методом навивки с натягом на упругий центр материалов с высокой одноосной прочностью – проволоки, ленты, волокон со связкой (склеивкой). Эксплуатируется супермаховик не в воздушной среде, а в среде с пониженными сопротивлениями вращению, например вакууме. Первый патент на супермаховик (в патенте он назван просто маховиком, назвать изобретение неизвестным термином было нельзя) имел советский приоритет от 15.05.1964г. №1048196, автор – Гулия Н.В., а первые запатентованные зарубежные аналогичные (витые) маховики имели приоритет лишь от января 1965 года. Правда, наше «родное» советское патентное ведомство провозилось с экспертизой этого изобретения 19(!) лет и патентный документ (тогда он назывался «авторское свидетельство») был выдан лишь в 1983 году, когда супермаховики уже «вовсю» эксплуатировались во всем технически развитом мире. Так наша страна «прозевала» все возможности, связанные с реализацией патента за рубежом. А «держало» выдачу патента заключение «видного» профессора Бронетанковой академии полковника Р.В. Ротенберга, гласящее, что «маховики должны изготавливаться литьем или ковкой, а не навивкой». Навивка маховика – это, дескать, неумная выдумка вчерашнего студента (Н.В. Гулия тогда было 24 года), и признавать это изобретение никак нельзя.

Иначе, как вредительством, такое заключение назвать нельзя. Сделав свое «черное» дело профессор Ротенберг эмигрировал за рубеж и там скончался. Конечно же, критерий «промышленная полезность», согласно которому требовалось заключение специалиста – это дикость связанная с тогдашним патентным законодательством. Ну, какой нормальный специалист, разрабатывающий свою концепцию, даст «без отката» отзыв на другую, явно конкурирующую с ней. Теперь, конечно, этот критерий изъяли, и получайте патенты на что хотите, лишь бы это было ново. Платите пошлину и получайте патент, хоть на «бестопливный двигатель»!

По правде говоря, маховики, формально навитые, патентовались и в 19 веке, в Германии, в частности. Но те маховики были огромного размера, и изготовить их ковкой или литьем было невозможно. Поэтому центр их был сборный со спицами с ложбиной по периферии, и ложбина эта заполнялась гнутым металлическим прутком с приваренными концами. Разумеется, эксплуатировался такой сборный маховик в воздушной сфере, а не в вакууме, как супермаховик; частота вращения его была небольшой, а удельная энергия и вовсе ничтожной. Просто, изготовить такой сборный из отдельных частей огромный маховик было гораздо легче и дешевле, чем отлить или ковать его. Поэтому супермаховиками такие маховики не могли быть, при быстром вращении у них прежде всего распался бы сборный центр. Патентная экспертиза все это учитывала при выдаче патента.

Несмотря на существующие три основных вида супермаховиков – **проволочные, ленточные и волоконные** – распространение в технике получили лишь волоконные. Еще бы – волокна, особенно углеродные, отличаются исключительной прочностью при малой плотности. А удельная энергоемкость (запасенная энергия в каждом килограмме массы) маховика прямо пропорциональна прочности его материала и обратно пропорциональна его плотности. Поэтому, даже, если прочность углепластика, в который превратилось навитое со связующим углеволокно, равна прочности лучшей стали, то удельная энергоемкость супермаховика из углепластика будет в 5...6 раз больше, чем у стального. Потому, что во столько же раз плотность углепластика меньше плотности стали.

Навивка углеволокна со связкой – процесс технологически хорошо проработан, и углепластиковые супермаховики сегодня самые распространенные (рис.1).

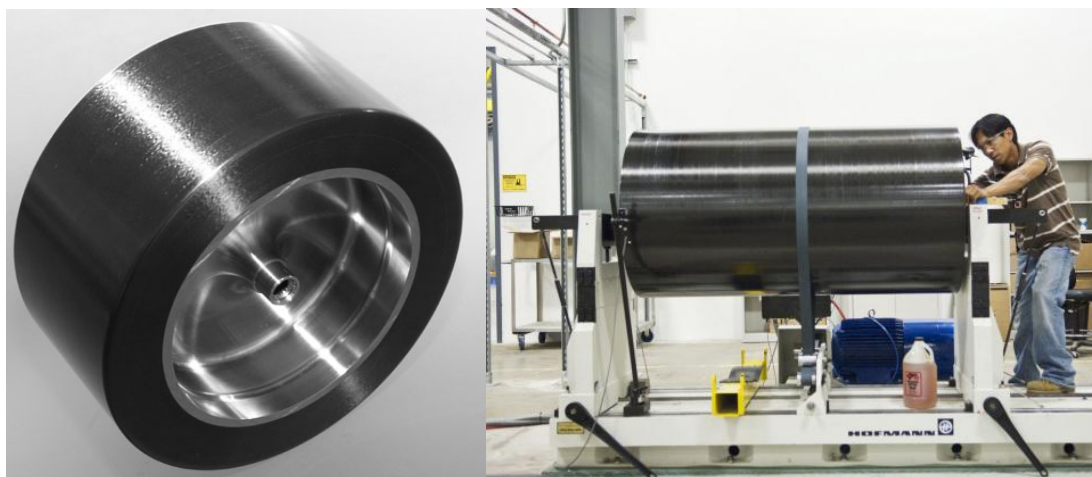


Рисунок 1 – Углеволоконные супермаховики.

Проволочные супермаховики не прижились в технике из-за неустойчивости поведения проволочной навивки при высоких напряжениях в проволоке.

А о ленточных маховиках мы поговорим особо. В предыдущей «идее» - это был супермаховик из суперкарбона, буквально, фантастический по своей удельной энергии. Не буду повторять цифр – они, действительно, впечатляют. Конечно же супермаховики из суперкарбона – дело далекого будущего. Даже с учетом пока фантастической стоимости суперкарбона.

Однако, витые из волокон со связкой, в том числе и из обычных углепластиков, супермаховики имеют и недостатки, о которых надо упомянуть. Не может не удивлять то, что вокруг супермаховика из углепластика помещено толстенное и тяжеленное «броневое» кольцо, превышающее по массе сам витой супермаховик. Ведь супермаховики при их случайном разрыве не дают осколков. Да и потом, разве нельзя не доводить частоту их вращения до предельной?

А дело в том, что, во-первых, разрыв углепластикового супермаховика хоть и безосколочен, но по мощности равен взрыву безоболочечного фугаса, той же массы(рис.2). И эта мощность – немалая.



Рисунок 2 – Последствия разрыва волоконного супермаховика.

Во-вторых, исследования напряженного состояния навитой части супермаховика показывают, что усталостные и ряд других явлений, могут привести к случайному разрыву витых волоконных супермаховиков. По этой причине и надевается бронекольцо на корпус супермаховика.

В результате теряется главное достоинство супермаховика – малая масса. И при этом остаются другие недостатки – огромная частота вращения, требующая особых (магнитных) подшипников, высокого вакуума в корпусе. Из-за этой высокой частоты вращения нельзя «вывести» вал небольших супермаховиков (менее двух метров в диаметре) наружу из корпуса с помощью магнитожидкостного уплотнения.

А уж если этот супермаховик из суперкарбона! Тогда этот «безоболочечный» супермаховик уже должен быть атомным по энергии взрыва!

Супермаховик из суперкарбона нужно будет заглублять на большую глубину под землю, чтобы уберечь от разрушений, при случайном его разрыве, все вокруг. И какое раздолье террористам, имеющим возможность в чемоданчике пронести миниатюрную атомную «бомбочку» куда захотят и взорвать ее там обычным взрывателем (детонатором и пр.).

А теперь рассмотрим супермаховики ленточные и их специфические свойства и преимущества.

Каков он – ленточный супермаховик?

Впервые ленточные супермаховики были изготовлены и испытаны Н.В. Гулиа в 1966 году. Изготовлены они были из стальной холоднокатаной ленты толщиной 0,1 мм и шириной 40 мм (рис.3) со склейкой ленты клеем БФ-2. Навивалась лента на фанерный центр, в котором был закреплен гибкий валик для подсоединения к разгонному стенду ВРД-300 в ЦНИИТМАШ. Все работы производились, конечно же, вручную, как говорят на «коленке». Стенд ВРД-300 позволял испытывать маховики только до 300 мм диаметром, поэтому диаметр супермаховиков был всего 280 мм.

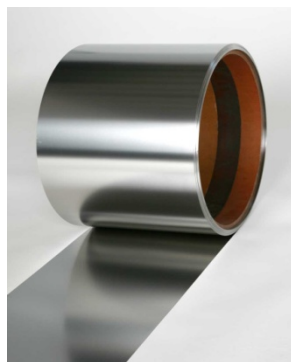


Рисунок 3 – Стальная лента для изготовления ленточного супермаховика.

Ленту удалось найти только 2-й группы прочности, она менее прочна, чем 3-й группы прочности. Предел прочности, соответственно, 1600 МПа, вместо около 2000 МПа у 3-й прочности. Но, несмотря на «ручное» изготовление и не самую лучшую ленту, результаты испытаний были очень неплохие. Супермаховик разогнался более, чем до 28000 оборотов в минуту, окружная скорость его достигла **400 м/сек**, а напряжения в ленте – 1300 МПа. Удельная энергоемкость супермаховика достигла **80 кДж/кг**, что существенно больше, чем у любых стальных маховиков того времени.

Но главное – разрыв ленточных супермаховиков был совершенно безопасен! Разрывался лишь внешний виток ленты, он отходил от навивки и прижимался к внутренней поверхности корпуса супермаховика, иначе говоря, корпуса испытательного стенда. Тоненькая (1мм) стенка этого корпуса даже не

выпучилась от этого прижима, только отшлифовалась изнутри от трения ленты. После этого обрезался изношенный конец ленты, приклеивался снова и испытывался супермаховик. Результаты были те же (рис.4).

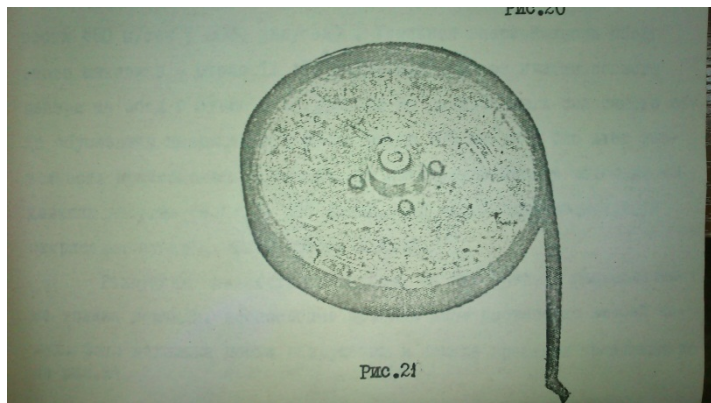


Рисунок 4 - Супермаховик Н.В.Гулиа после испытаний (1966г.)

Пару слов о том, как приклеивался последний виток ленты. Если просто приклеить его «внахлест», то он отрывался даже при небольшой частоте вращения супермаховика. Но мы приклеивали его «по-хитрому» (на способы такой склейки потом были получены патенты!). Мы плавно сужали ширину ленты, делали несколько витков этой узкой лентой, а затем конец подсовывали под эти витки. Конец ленты обрывался, а не «выдирался» из-под навивки. Это-то и требовалось для ленточного супермаховика!

Надо сказать, что ленточные супермаховики изготавливались и испытывались (уже позже) известным специалистом по супермаховикам, изобретателем Дэвидом Рабенхорстом в университете Д. Хопкинса (США). Но его ленточные супермаховики, изготовленные, кстати, из очень прочной ленты из стали аморфной структуры (метгласса), разрывались не так безопасно, как вышеописанные супермаховики Н.В. Гулиа. Супермаховики Д.Рабенхорста разрывались целиком, распадаясь на мелкие обломки (рис.5), совсем как углепластиковые маховики, что небезопасно и о чем уже говорилось ранее. В чем же дело?

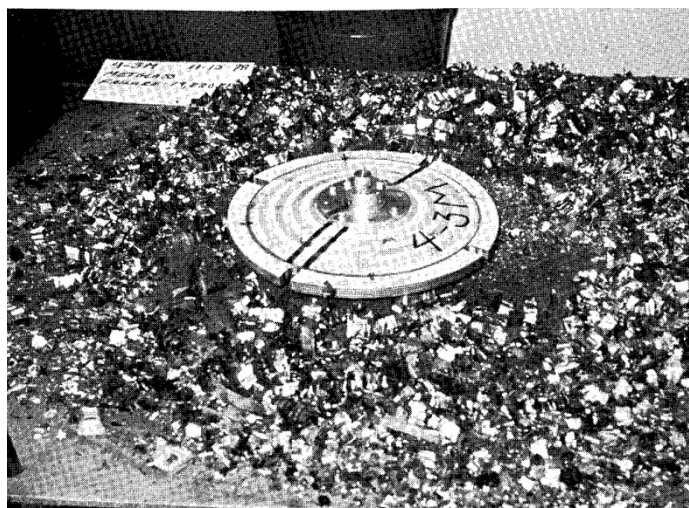


Рисунок 5 - Разорванный ленточный супермаховик Д.Рабенхорста (1977г.).

Вот тут-то пора вспомнить о том, в каких «антисанитарных» условиях готовились первые ленточные супермаховики Н.В. Гулиа.

Весь супермаховик мотался из ленты со склейкой старинным клеем БФ-2, но с соблюдением хоть какой-то технологии. Но последние витки (когда надо было навивать узкую ленту, подконец «просовывая» конец ленты под эти, уже смазанные жидким клеем витки), оказывались склеенными со всей остальной навивкой не по технологии, иначе говоря «халтурно». Они хоть и удерживали узкий конец ленты от самопроизвольной размотки, но к остальным, предыдущим виткам были приклеены слабо. Вот из-за этой-то «халтуры» в склейке последних двух-трех витков наш ленточный супермаховик и разрывался безопасно – рвался только последний виток, немного разматывался, прижимался к корпусу и трением об него тормозил супермаховик. Когда же витки приклеивались должным образом – супермаховик разрушался целиком – то есть опасно, как у Д.Рабенхорста. В чем же здесь дело?

Тут необходимо небольшое отступление в теорию упругости, но в чрезвычайно упрощенном виде. При вращении тонкого кольца в нем возникают механические напряжения σ в Паскалях:

$$\sigma = \rho \omega^2 r^2, \quad (1)$$

где ρ -плотность материала кольца, кг/м³;

ω – угловая скорость вращения кольца, радиан в секунду;

r – радиус кольца, м.

Стало быть, если витки ленты не связаны друг с другом, то внешний виток, где радиус r максимален, напряжен больше других. Но если витки не склеивать, они отойдут друг от друга, собьются на сторону и нарушат балансировку. Такой супермаховик и раскрутить будет невозможно!

Теперь посмотрим, какие же напряжения возникают в ленточном супермаховике, если все витки ленты жестко соединены друг с другом, как бы сварены. Здесь максимальные напряжения уже не во внешнем витке, а во внутреннем, причем максимума они достигают, когда диаметр этого внутреннего витка бесконечно мал, практически равен нулю.

$$\sigma \approx 0,825\rho\omega^2r^2. \quad (2)$$

То есть эти напряжения приближаются к значению для тонкого кольца. А внешний виток («приваренный» к остальным) напряжен совсем незначительно, примерно в 5 раз меньше. Таким образом, разорваться уже должен не внешний, а внутренний виток, а за ним, как по цепной реакции, и все остальные! Разрыв станет опасным, так как разорвется весь супермаховик!

Примерно так поведет себя и ленточный супермаховик с отверстием любого диаметра.

А если витки супермаховика не сварены, а склеены друг с другом клеем, который поэластичнее сварки? Где будут тогда максимальные напряжения, и какой виток разорвется первым?

Тут уже задача посложнее предыдущих, но кратко можно ответить так.

- Жесткие клеи, наподобие эпоксидных без пластификатора, дают картину, очень близкую к сварной модели – внутренние витки будут

напряжены больше наружных и разрыв такого супермаховика будет полным и опасным.

- Очень эластичные клеи, по эластичности ближе к каучуковым клеям, «выравнивают» напряжения во внешнем и внутренних витках, и в зависимости от эластичности и толщины слоя клея максимальные напряжения могут быть как во внешнем витке (разрыв безопасен), так и во внутреннем витке (разрыв опасен). Но эти напряжения меньше, чем максимальные напряжения в «жестком» (сварном) супермаховике и в тонком кольце. Полагаться при этом на точность значений этих напряжений, зависящих от слоя клея, опасно – гарантировать, что первым разорвется внешний, а не внутренний виток, нельзя.

- Случай, когда один или малое число витков (один-три) внешних витка практически отсоединены от остальных (внутренних) витков, склеенных эластичным клеем, наиболее желателен. Тогда в любом случае внешние витки будут напряжены больше внутренних, да еще, если они ослаблены закреплением конца навивки, и разорвутся именно эти внешние витки. Разрыв супермаховика будет безопасным. Но как «отсоединять» эти внешние витки от остальных пока сказать не могу, это пока только патентуется, а поэтому разглашению не подлежит!

Итак, сделаем основные выводы по ленточным супермаховикам.

1. Ленточный супермаховик изготавливается из материала с детерминированными свойствами – металла, и поэтому вероятность случайного разрушения ленты где-то внутри навивки исключительно мала.

2. Даже в случае состыковки между собой концов двух разных кусков ленты (случай, обязательно встречающийся при навивки крупных супермаховиков), месторасположение максимальных напряжений почти не изменится. Это обусловлено тем, что даже небольшая длина склейки выдерживает на сдвиг силу, превышающую разрывную для ленты. Поэтому в

зоне нарушения целостности ленты возникнет ничтожное по величине повышение напряжений в близлежащих внешних и внутренних витков, не влияющее на безопасность разрыва.

3. Для обеспечения, при превышении супермаховиком «разрешенной» частоты вращения, разрыва именно внешних (1..3) витков, что гарантирует безопасность выхода из строя супермаховика, эти витки должны быть максимально изолированы по силовому воздействию с остальными витками ленты, что достигается различными (пока неразглашаемыми!) способами.

Графеновая бумага, как материал для ленточных супермаховиков.

С открытием такого перспективного материала, как графен, ученые и инженеры начали поиск его практического применения. И, пожалуй, наиболее эффективным практическим применением графена является так называемая графеновая бумага (**Graphene paper - GP**). Она образуется при соединении друг с другом тончайших графеновых пленок до толщины 1...3 микрон и более. Получается гибкий и чрезвычайно прочный материал, чем-то похожий на бумагу, но несколько потяжелее ее (плотность GP около 1400 кг/м^3), а главное – на порядок прочнее углеродистой стали. Графеновая бумага (рис.6) была получена учеными технологического университета города Сиднея (Австралия) под руководством профессора Госю Вана. Предполагается, что графеновая бумага благодаря низкой стоимости, потеснит даже углепластики, находящие себе широчайшее применение, в том числе и для изготовления супермаховиков. А ведь кроме низкой стоимости, графеновая бумага, выпускаемая в виде тонких лент, может служить великолепным материалом для изготовления ленточных супермаховиков!

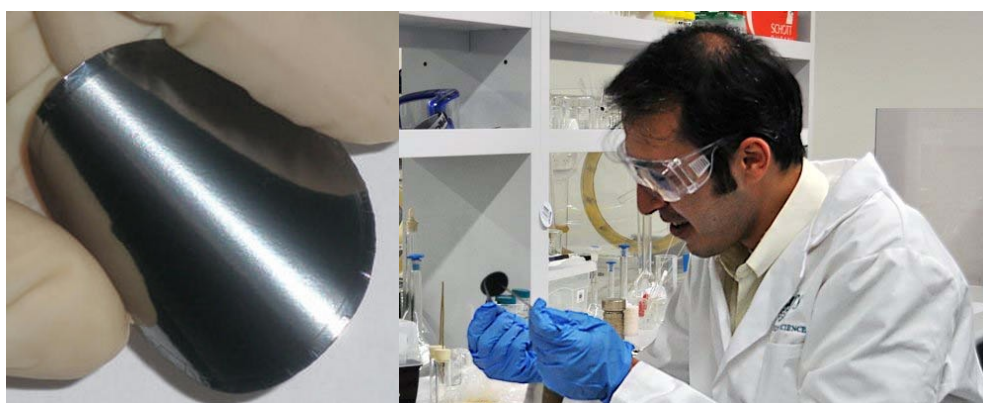


Рисунок 6 – Графеновая бумага.

Посмотрим, что может дать использование графеновой бумаги в качестве материала для ленточных супермаховиков, основные свойства которых были описаны выше. Так как плотность графеновой бумаги в среднем в 5,5 раз ниже

плотности стали, а прочность в 10 раз больше, удельная энергоемкость e выразится:

$$e = k, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где k – коэффициент формы супермаховика, как, впрочем и любого тела вращения, для тонких колец, из которых состоит супермаховик, $k=0,5$;

σ - напряжение, Па;

ρ - плотность материала, кг/м^3 .

Хочется отметить, что формула (3) была впервые опубликована в 1965 году, то есть почти полвека назад. Аспирантом Н.В. Гулиа в ведущем отечественном журнале «Вестник машиностроения». Как, собственно, и обоснование точных значений коэффициентов формы для различных тел вращения. Интересно, что в первое время авторы, приводящие эту формулу, да и расчет коэффициента формы, ссылались на их разработчика. А теперь по прошествии стольких лет, они перестали это делать, видимо, считая материалы эти уже «хрестоматийными»!

Итак, согласно формуле (3) удельная энергоемкость ленточных супермаховиков из графеновой бумаги будет выше, чем у таковых из стальной ленты в $5,5 \times 10 = 55$ раз! Если взять для сравнения даже первый ленточный супермаховик, изготовленный из ленты «второсортной» прочности и на «коленке», имевший удельную энергоемкость 80 кДж/кг, то удельная энергоемкость нового супермаховика составит 4,4 МДж/кг. В киловатт-часах это составит свыше 1,2 кВт*ч/кг, что во много раз выше, чем у любых других накопителей энергии. А если взять для сравнения стальную ленту высокого качества, то тогда эта цифра будет еще выше! Важно только знать с какой сталью сравнивали прочность графеновой бумаги ее создатели.

И если с прочностью нового материала еще имеется хоть какая-то ясность, то с модулем упругости графеновой бумаги этой ясности нет. В разных источниках этот показатель трактуется по-разному, разные приводятся и цифры. Поясним сказанное.

В большинстве источников говорится, что модуль упругости при изгибе или изгибная жесткость графеновой бумаги в 13 раз больше, чем у стали. Другие же источники утверждают, что модуль упругости или модуль Юнга близок к таковому у стали, чуть превышая его. Это чистой воды недоразумение.

Модуля упругости «при изгибе» не бывает. Изгибная же жесткость выражается как произведение модуля упругости (модуля Юнга) на осевой момент инерции поперечного сечения ленты, зависящий только от размеров сечения ленты. Так что, если изгибная жесткость выше, чем у стали в 13 раз, то и обычный модуль упругости (модуль Юнга) выше во столько же раз. Если бы речь шла о сдвиге, то там совсем другой модуль - сдвига, меньший, а не больший модуля Юнга. Одним словом, при конструировании ленточного супермаховика из графеновой бумаги надо рассчитывать, что прочность ее может быть действительно раз в 10 больше, чем у стали. А модуль упругости надо принимать в расчете минимальный, то есть чуть больше, чем у стали. Почему же так? Потому, что при конструировании витых, в том числе из ленты, супермаховиков, решающее значение имеет плотность посадки витого обода на центр. Если центр при вращении «растягивается» меньше, чем внутренняя поверхность обода супермаховика, то обод просто потеряет связь с центром, соскочит с него. Следовательно, при конструировании центра в расчет надо принимать наименее жесткий материал ленты, с минимальным модулем упругости, так как в этом случае внутренняя поверхность обода будет «растягиваться» максимально. Особенно в случае максимальных напряжений в ленте, каковые (в 10 раз больше, чем у стали!) мы принимаем. Вот какими обстоятельствами вызвано наше, странные на первый взгляд, предположение о прочности и модуле упругости графеновой бумаги!

Из чего делать центр?

Для стальных ленточных супермаховиков вполне подходит центр из текстолита конструкционного ПТК (рис.7). Он и достаточно прочен, и модуль упругости у него невысок, то есть упругое удлинение, или «вытяжка» по диаметру при вращении достаточно большая, больше, чем у стальной ленты. Поэтому, если уж мы вставим центр в ленточный супермаховик, а точнее навели стальную ленту на текстолитовый центр, прилегание друг к другу этих двух деталей при увеличении частоты вращения будет все увеличиваться. Упругое удлинение внутренней поверхности ленточного супермаховика никогда не превысит полпроцента. Ведь напряжения во внутреннем витке навивки стальной лентой никогда не превысит 1 ГПа, а модуль упругости стали – в 200 с лишним раз больше!



Рисунок 7 – Текстолит для изготовления центральной части ленточного супермаховика.

Если же рассчитывать на то, что прочность графеновой бумаги в 10 раз больше, то есть напряжения во внутреннем витке графеновой ленты составят 10 ГПа, а модуль упругости будет больше, чем у стали, допустим в 1,2 раза (это и есть «чуть» больше!), то упругое удлинение этого внутреннего витка составит чуть более 8%. Такого упругого удлинения никакой текстолит не выдержит, тут нужен какой-нибудь материал, типа твердой резины. Но такие, и даже более

твердые сильнорастяжимые материалы – пластмассы, теряют устойчивость при сверхвысоких частотах вращения. Материал из центральной зоны стремится наружу с огромной силой и разрушается, начиная с центральных зон. А еще раньше он просто теряет устойчивость и «выбрасывается» набок. Опыты Н.В. Гулия с супермаховиками из высокопрочного стеклопластика показали, что ни текстолит, ни жесткая резина не выдерживают частоты вращения, вернее, огромной скорости и напряжений при этом $\sigma = \rho v^2$, даже для стеклопластика. А у графеновой бумаги эти показатели в разы больше! Что делать?

Отвечаем: если уж в качестве ленты для супермаховика мы выбираем уникальный материал – графеновую бумагу, то и центр для такого супермаховика надо будет делать тоже из уникального, хотя и менее, чем графеновая бумага. Этот материал – сплав никеля и титана, называется **НИТИНОЛОМ** (у него есть и другие названия), и известен он как материал с «памятью» формы. И, оказывается, что у этого материала, есть другие, менее известное, но ценное для нас свойство – **псевдоупругость**. Если коротко, то этот материал, термообработанный особым образом, может деформироваться, с первого взгляда упруго, на порядок и более, чем лучшие стали.

В действительности, эта деформация не упругая, а «псевдоупругая», с виду упругая, а в действительности, связанная со структурными преобразованиями в материале. Такая деформация обеспечивает даже большее число циклов, чем упругая деформация. Всем она хороша, только, если растянуть проволоку из такого материала с силой в 500 Ньютонов на 8..10% (т.е. в 20 раз больше, чем сталь!), а потом отпустить, то сжимаясь до прежних размеров, она разовьет силу всего 200...300 Ньютонов. Вот такой большой гистерезис у этого материала (рис.7)! И даже несмотря на это из него делают так называемые «суперпружины», деформирующиеся больше, чем обычные до 20 раз!

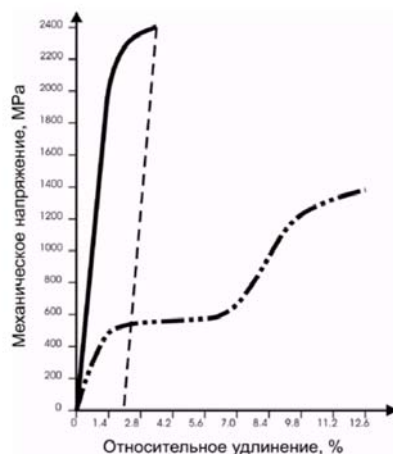


Рисунок 8 - Схема позволяющая сравнить упругие свойства нержавеющей стали и NiTi сплава. При относительном удлинении свыше 1.5-2% такой материал, как нержавеющая сталь мгновенно разрушается, а NiTi сплав нет вследствие смены фазового состояния.

Однако прочностные характеристики стали гораздо выше чем у NiTi в пределах небольших упругих деформаций.

Нам же для использования в качестве центра супермаховика, такой гистерезис никакой роли не играет; центр из нитинола «отследит» любую упругую деформацию внутреннего витка супермаховика из графеновой бумаги, постоянно прижимаясь к этому витку (внутренней поверхности обода супермаховика). При этом прочность нитинола – что у хороших углеродистых сталей – до 1,3 ГПа. Цена, конечно же, повыше, чем у стали, но ведь и графеновая бумага, как бы она ни была дешева, подороже стальной ленты будет! Зато киловатт-часы, накопленные в каждом килограмме массы этого супермаховика, при недостижимой ни для какого другого накопителя удельной мощности, да еще при его безопасном выходе из строя при случайном (или злонамерном!) превышении допустимой частоты вращения – поистине, должны цениться дороже золота!