

## Беседа 5 «Супермаховики»

В предыдущих беседах говорилось о страшной опасности разрыва монолитных маховиков, используемых до сих пор в накопителях кинетической энергии. Осколки таких разорвавшихся маховиков подобны артиллерийским снарядам – они пробивают толстые защитные устройства, что видно из рис.1. На рис.2 показан маховик, разорвавшийся, как бывает чаще всего, на три части.

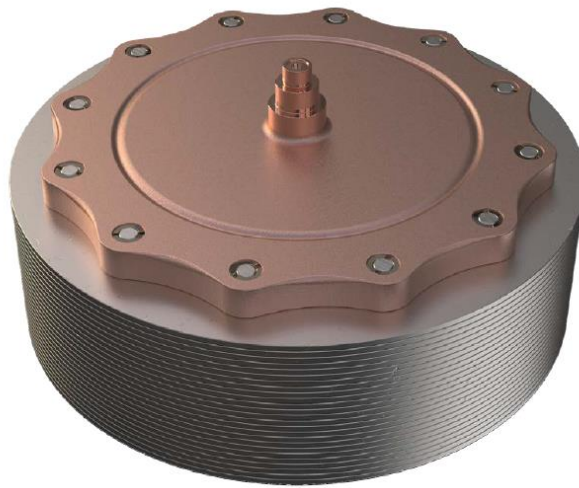


Рис.1

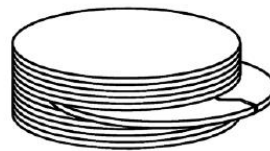
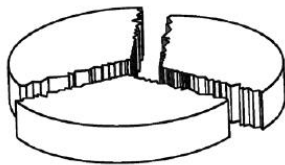


Рис.2

Стремясь уменьшить опасность разрыва монолитных маховиков, английский профессор Кейт Пуллен предложил изготавливать маховик из набора тонких – около 2 мм толщиной – стальных дисков без центрального отверстия и вала в нем. Скреплялись эти диски множеством болтов, проходящих в отверстия на периферии дисков и скрепленных с фасонными фланцами с каждого торца «набора» рис.3 а. При диаметре всего 17 см (большие диски очень трудно изготавливать прочными), этот «наборный» маховик вращался с колоссальной скоростью 50 тыс. оборотов в минуту. Какой при этом использовался электродвигатель и подшипники, способные выдержать такие обороты, мне неизвестно.



а)



б)

Рис.3

На рис. 3 б показан разрыв монолитного маховика, «наборного» маховика Пуллена и витого из углеродных волокон супермаховика.

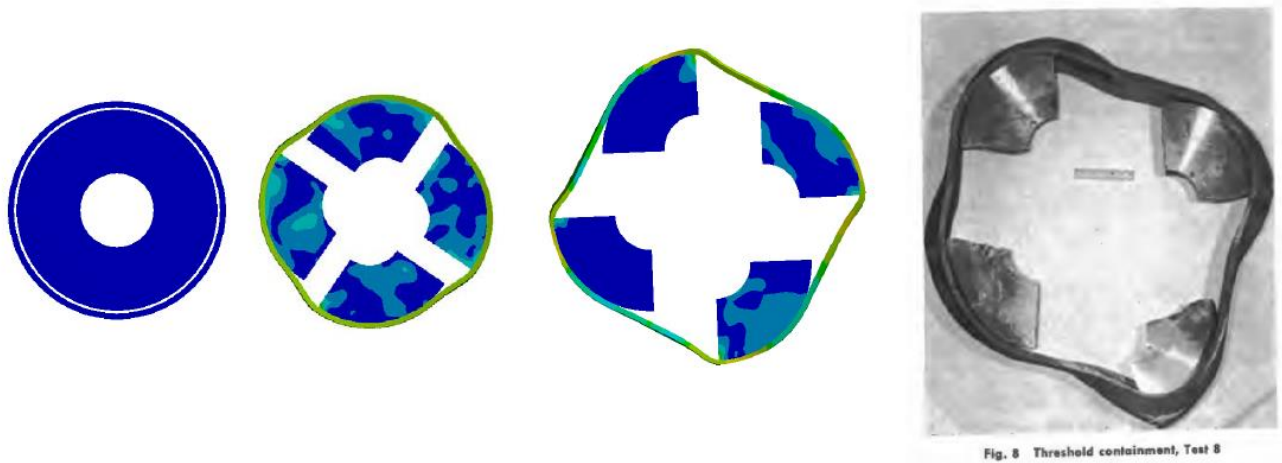


Рис.4 – Разрыв тонкого диска в корпусе

Из опытов видно, что разрывался обычно только один диск, дающий небольшие по величине осколки (рис.4), удерживаемые достаточно толстым корпусом. Энергоемкость этого «наборного» маховика небольшая – всего 0,14 кВт\*ч при весе 13,7 кг. Напомним, что один супермаховик нашей компании «Кинетик» накапливает 5 кВт\*ч при весе 300 кг, что в 1,5 раза больше чем у наборного маховика. Еще бы – прочность стальной ленты, из которой навит маховик больше, чем у дисков, и форма его в виде обода выгоднее, чем в виде диска без отверстия.

Заметим, что «наборный» маховик, очень близкий к маховику Пуллена, был запатентован нами в российском патенте рис.5.

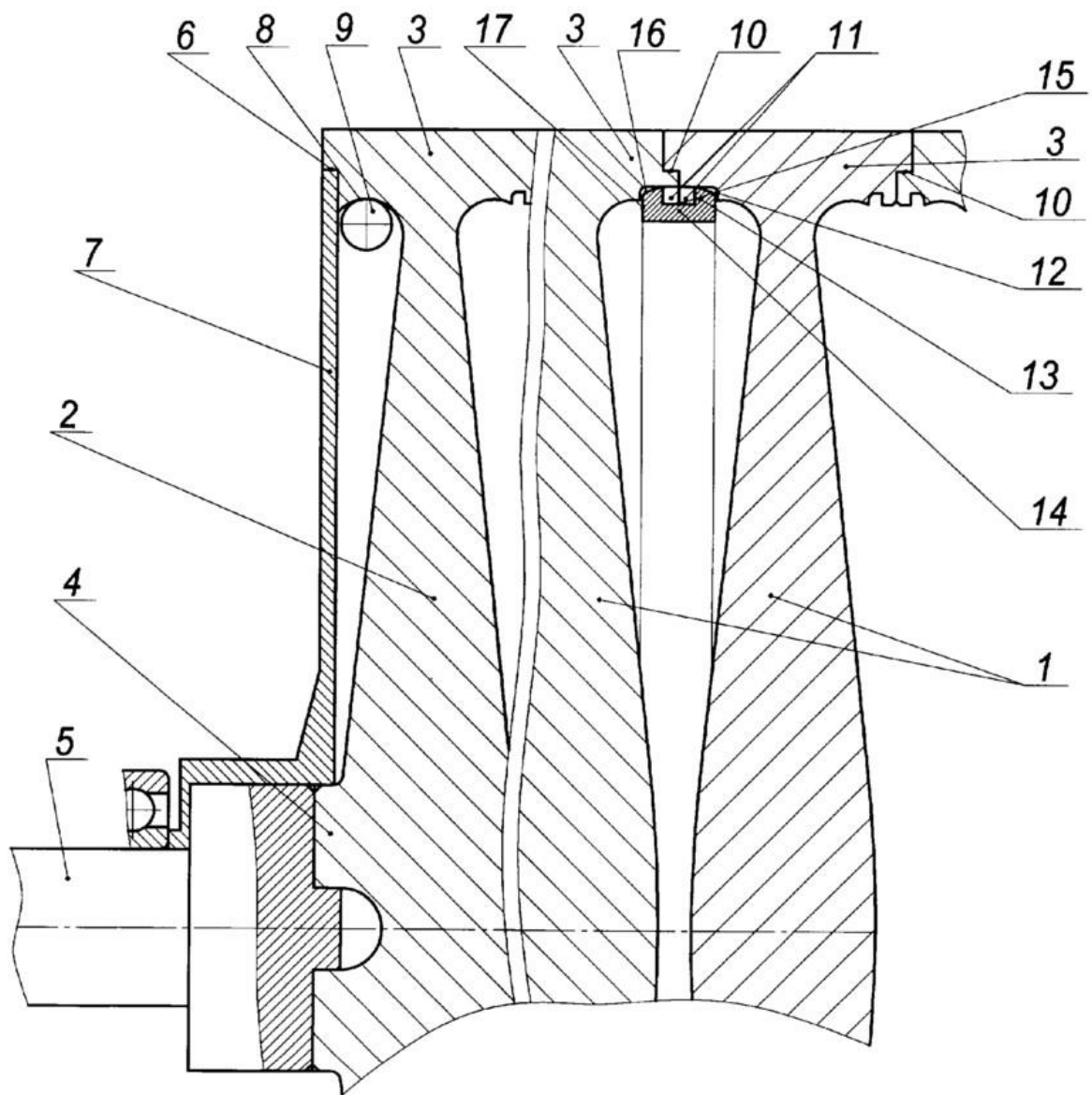


Рис.5

Зная о страшной особенности разрыва кованных маховиков, я уже в студенческие годы стал задумываться на тем, как предотвратить крайне опасный разрыв этих маховиков. И уже в мае 1964 года я подал свою первую в мире заявку на изобретение разрывобезопасного маховика, впоследствии названного «супермаховиком», не кованного, а намотанного из проволоки или лент высокопрочной стали, с особым образом закрепленным последним витком. Такой супермаховик мог не только в несколько раз повысить запас накопленной энергии по сравнению с кованным того же веса,

но и гарантировать его безопасный разрыв. Последний виток такого супермаховика разрывался первым и торможением оторванного витка о корпус безопасно тормозил весь супермаховик. Это было многократно проверено на опытах, в том числе и в головном научно-исследовательском институте ЦНИИТМАШ, где имелись специальные разрывные стенды рис. 6-7

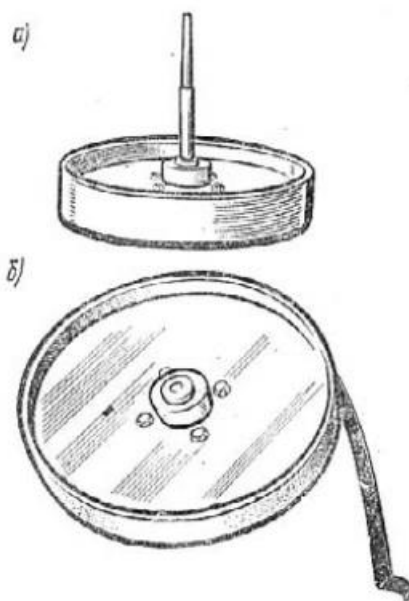
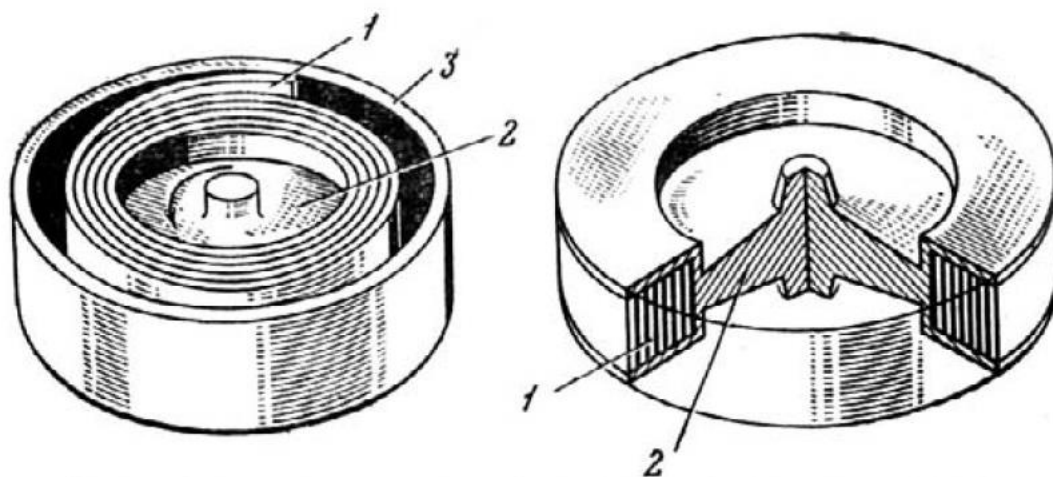


Рис. 6



Маховик, навитый из ленты, и картина его разрыва в кожухе (справа)  
1 — лента, 2 — центр, 3 — кожух

Рис.7

Но поданную заявку на изобретение консервативное тогда патентная система СССР рассматривала почти 20 лет, пока ведущие страны мира не стали повсеместно производить витые супермаховики. Однако, приоритет нашей страны – май 1964 года – сохранен в выданном патенте, что дало только идеологические, но не экономические выгоды из-за колоссального запоздания в выдаче патента. После этого нами были получены сотни патентов на навитые из лент супермаховики, что закрепило наш ведущий вклад в создание таких накопителей энергии.

Между тем, почти все зарубежные витые супермаховики навивались из высокопрочных углеродных волокон, могущих накапливать огромную энергию, но не разрывающихся безопасно. А разрыв их мог наступить даже при их допустимой рабочей скорости, что показано во многих случаях и этот разрыв очень опасен см. рис.8. Поэтому по нашему мнению, супермаховики, навитые из серийно выпускаемой стальной ленты, разрабатываемые компанией «Кинетик» являются на наш взгляд являются самыми надежными и недорогими накопителями кинетической энергии.



Рис. 8

Конечно, в будущем такие супермаховики могут изготавливаться и из более прочных лент, например графеновых (рис.9), но под тем же принципом и технологиям, что из стальных лент. Вот какие гигантские перспективы у витых ленточных супермаховиков!!!

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<sup>3</sup>), а главное – на порядок прочнее углеродистой стали. Графеновая бумага 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!

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:

$$e = k \frac{\sigma}{\rho}, \text{ Дж/кг}$$

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

$\sigma$  - напряжение, Па;

$\rho$  - плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Хочется отметить, что формула (3) была впервые опубликована в 1965 году, то есть почти полвека назад аспирантом Н.В. Гулиа в ведущем отечественном техническом журнале «Вестник машиностроения». Как, собственно, и обоснование точных знаний коэффициентов формы для различных тел вращения.

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!

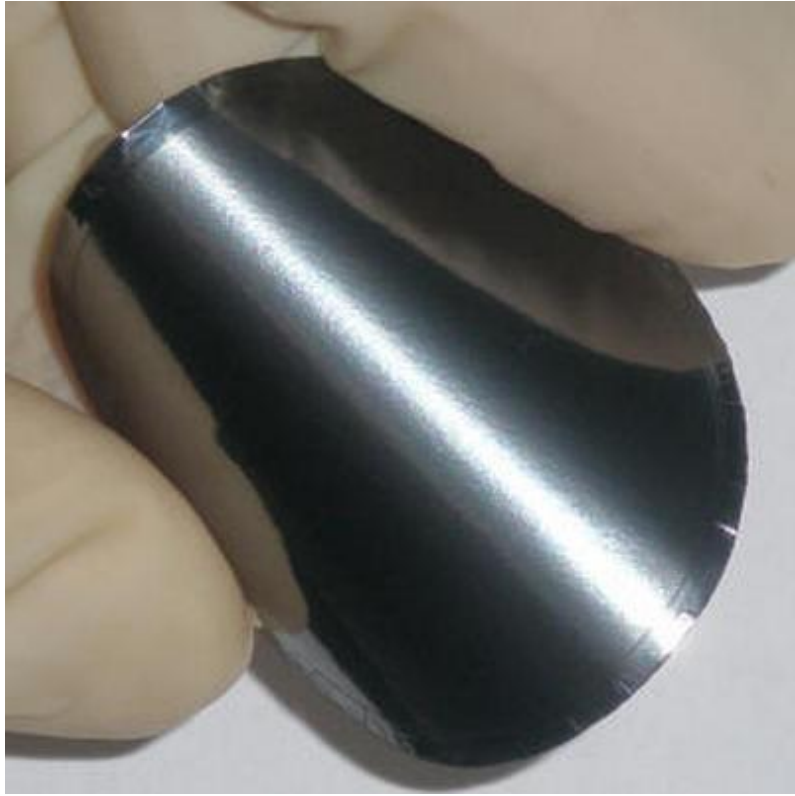


Рис.9