

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ УПРУГИХ
ЭНЕРГОПЕРЕХОДОВ

А.М.Трусь

Введение. Согласно закону сохранения энергии в любом свободном упругодеформированном твердом теле максимальная потенциальная энергия (работа деформации) всегда будет постоянной (если пренебречь энергопотерями на трение), что схематически показано на рис 1 а, б.

$$U_p = U_c = A_p = A_c = \frac{F_p X_p}{2} = \frac{F_c X_c}{2} = \frac{k_p X_p^2}{2} = \frac{k_c X_c^2}{2} = \frac{F_c^2}{2k_c} = const \quad (1)$$

где U_p, U_c - максимальная потенциальная энергия растяжения и сжатия;

A_p, A_c - работа деформации;

F_p, F_c - восстанавливающие силы;

X_p, X_c - деформации;

k_p, k_c - коэффициенты жесткости, упругости.

При этом, для исключения влияния реальной структурной неоднородности, несплошности и анизотропии материала на распределение упругой энергии, в объеме твердого тела используется упрощение Коши (1), согласно которому реальной структурой тела пренебрегают, считая его однородным, сплошным и изотропным. Кроме того полагают, что оно строго подчиняется закономерности Р. Гука (2) при растяжении и сжатии

$$F_p = -k_p X_p \quad (2)$$

$$F_c = -k_c X_c \quad (3)$$

Приведенная естественно-научная картина упругодеформированного твердого тела является господствующей в современной науке и технике, но она не объясняет механики сброса упругой энергии при аномально малых напряжениях, а также природы возникновения и развития усталостных трещин. Для этого используется явление концентрации напряжений. Инглизса (3) на естественных и искусственных дефектах структуры, которое также не разрешает имеющихся противоречий,

особенно для пластичных материалов. Кроме того существует нерешенная проблема прямого использования упругой энергии твердого тела для производства полезной работы требуемой мощности.

Уместно заметить, что создание боевого лука в доисторические времена (4), явилось блестящим интуитивным решением подобной задачи, а именно, прямого твердотельного преобразования упругой энергии в полезную работу большой мощности. Однако, судьбе было угодно переориентировать научис-технический прогресс с использования упругих твердотельных энергопреобразователей на использование жестких многосвязных механических систем, соединенных упругими, жесткими и шарнирными связями между собой. Это направление стало господствующим, что, в конечном итоге, привело к чрезмерному усложнению статике, кинематики и динамики современных технических устройств, повышенной их материалоемкости и энергозатратности. В настоящее время стало очевидным, что дальнейшее продолжение этого пути развития науки и техники тупиковое, особенно в условиях нарастания истощения невозполнимых природных ресурсов, взрывного роста численности населения и увеличивающихся его потребностей.

Главной целью настоящей работы является доказательство того, что:

1. Определенные виды несплошностей в твердых телах являются чрезвычайно эффективными прямыми преобразователями упругой энергии в обратную работу предельной мощности;

2. Использование подобных энергопреобразующих несплошностей чрезвычайно перспективно в научном и прикладном плане.

Чтобы решить эти задачи необходимо существенно пересмотреть закономерность Гука и предложение Коши, сблизив их с реальной структурой твердых тел. В частности необходимо:

1. Допустить, что в пределах линейности закономерность Гука может иметь изломы;

2. Допустить, что в пределах сплошности Коши возможна односторонняя упругоасимметричная несплошность;

3. Допущения подтвердить опытом и расчетом.

Основы теории. Прием для исследования физической модель твердого упругодеформированного тела соответствующую упрощениям Коши, но введем в него одну несплошность, как показано схематически на рис. 1. Пусть эта физическая модель строго соответствует математической модели, предложенной Р.Гуком.

Тогда при деформации возможны два случая поведения этой несплошности.

Первый случай. Единичная несплошность объемна и одинаково деформируется в процессе растяжения и сжатия. По Инглису она является концентратором напряжений в определенных своих точках, что схематически показано эпюрой "б" на рис. 1в. Опытом доказано, что σ_c не может превышать предела текучести σ_y , а следовательно усталостные трещины, возникающие на несплошностях, должны иметь пластический излом, тогда как в действительности он хрупкий, независимо от пластичности материала. Это противоречие не позволяет однозначно объяснить природу усталостных разрушений лишь концентрацией напряжений, на чем настаивают многие авторы. Очевидно существуют еще какие-то неизвестные науке механизмы.

На указанной несплошности отсутствуют какие либо предпосылки и особые условия для необратимого изменения упругой энергии и совершения работы при свободных колебательных движениях тела относительно положения равновесия. При этом, потенциальная и кинетическая энергия тела изменяется; как показано на графике рис. 1г.

Рассмотренный вид несплошности концентрирует напряжения (потенциальную энергию) в отдельных точках, но в пределах упругости не может преобразовывать упругую энергию в необратимую работу, в силу своей энергосимметрии.

Второй случай. Единичная несплошность пусть будет трещиновидна, как показано схематически на рис. 2а, т.е. односторонняя (энергосимметричная).

При сжатии тела она не оказывает никакого влияния на его жесткость, а при растяжении, за счет раскрытия резко изменяет ее величину, что схематически показано на рис. 2а и графически на рис. 2б. На линейности Гука появляется излом.

Как следует из графика, в силу закона сохранения, потенциальная энергия растяжения U_p будет равна работе сжатия A_c . Однако, из графика видно, что потенциальная упругая энергия сжатия составит незначительную часть всей работы сжатия, рачной U_p

$$U_p = A_c > U_c \quad (5)$$

Это неравенство потенциальных упругих энергий растяжения и сжатия показывает, что на трещиновидной несплошности совершается необратимая работа свободного тела над собой.

$$A_H = U_p - U_c = \frac{F_p x_p}{2} - \frac{F_c x_c}{2} = \frac{F_p x_p}{2} - \frac{F_p \frac{x_p}{K_c}}{2} = U_p \left(1 - \frac{K_p}{K_c}\right) = U_p \left(1 - \frac{K_p}{K_c}\right) \quad (6)$$

Исследуем полученную закономерность. При $K_p = K_c$, $U_p = U_c$, $A_H = 0$, т.е. подтверждается первый случай, когда несплошность в процессе деформации не изменяет своей геометрической формы необратимая работа не производится в силу ее двусторонности (энергетической симметричности).

Если $K_p < K_c$, то $U_p < U_c$, следовательно $A_H < 0$.

Приняв во внимание, что K_p можно задавать конструктивно вплоть до значений близких к нулю $K_p \rightarrow 0$, а K_c является величиной зависящей от модуля упругости, то при $K_p \rightarrow 0$, а $K_c \rightarrow \text{const}$, $A_H \rightarrow A_p$, т.е. почти вся упругая энергия подобного твердого тела может быть преобразована в работу над односторонней (энергетически ассиметричной) несплошностью вблизи состояния равновесия.

Если принять во внимание огромную скорость распространения волны упругой деформации в свободном упругодеформированном твердом теле, то становится очевидным, что на подобном упругом переходе можно получать необратимую работу очень большой мощности (в виде самоудара)

$$N = F_c V \quad (7)$$

Необратимая работа A_H совершается в устье несплошности, как показано схематически на рис. 2а точкой Z .

Открытие этого энергоперехода коренным образом изменяет естественно-научные представления об упругой энергетике твердых тел и является теоретической основой создания принципиально нового направления в механике твердого упругого тела.

Инженерные основы. Под инженерными основами, в данном случае, подразумеваются конструктивно-проектировочные приемы использования энергосимметричных несплошностей при создании технических устройств, их массовое производство и обеспечение выгодных показателей энерго-материалоемкости, производительности, надежности, долговечности и других параметров, по сравнению с традиционными.

Чтобы показать практическую эффективность предложенной теории в инженерном проектировании, промышленном производстве и технической эксплуатации воспользуемся конкретным случаем. Пусть имеется стальной круглый трубчатый (подый) стержень, который необходимо преобразовать в упругий энергосимметричный преобразователь. Пусть он, в соответствии с упрощениями Коши, будет сплошным, однородным, изотропным. Выполним в нем одну винтообразную, трещиновидную несплошность большой длины, как показано на рис. 2а.

При сжатии этого стержня заданная несплошность не влияет на его жесткость

$$K_c = \frac{EA}{l} \quad (8)$$

где E - модуль упругости; A - площадь поперечного сечения; l - длина стержня.

При его растяжении жесткость будет иной (5)

$$K_p = \frac{Ca^4}{\Delta D_y^3 i} \quad (9)$$

где C - модуль упругости при сдвиге; a - шаг спиральной несплошности; D_y - средний диаметр стержня; i - число витков несплошности; $\Delta \cdot \frac{E}{a}$ - табличное соотношение.

Графическое представление взаимосвязи сил и деформаций рассматриваемого твердотельного энергоспреобразователя схематически представлено на рис. 3в.

Подставив значения жесткости в закономерность (6) полученную теоретически и произведя все необходимые преобразования и подстановки получим расчетную зависимость

$$A_H = U_p \left[1 - 0,12 \frac{a}{b} \left(\frac{a}{D_y} \right)^4 \right] \quad (10)$$

Учитывая, что D_y всегда больше a и b , а соотношение последних величин может иметь разные значения, то задаваясь их численными значениями можно в каждом конкретном случае подсчитать величину производимой в устье несплошности работы. Зная время прохождения упругой волны через устье можно определить развиваемую механическую мощность. Соотнеся полезную работу и потенциальную упругую энергию

твердого тела легко определить коэффициент полезного действия при преобразовании упругой энергии в работу этой несплошностью.

В связи с тем, что этот вопрос заслуживает особого внимания рассмотрим примеры. Примем значения $a = b = \frac{2u}{2}$, что соответствует предельному случаю. Подставим заданные значения в расчетную формулу (10) и переписав ее можно вычислить коэффициент полезного преобразования упругой энергии

$$\eta = \frac{A_w}{U_p} \cdot 100\% = [1 - 0,12 \frac{a}{b} (\frac{a}{2u})^4] \cdot 100\% \approx 88\%$$

Пусть $d = b$, а $2u = 10b$, что является вполне реальным конструктивным элементом. В этом случае коэффициент полезного преобразования упругой энергии в работу составит

$$\eta = [1 - 0,12 (\frac{1}{10})^4] \cdot 100\% = 99,9\%$$

Самым примечательным в этом вопросе является то, что необратимая работа совершается в устье несплошности около состояния равновесия тела, тогда как концентрация напряжений имеет место тоже в устье несплошности, только на предельном удалении от состояния равновесия т.е. в упругой фазе деформации. Еще одной примечательностью рассматриваемого явления есть то, что время прохождения упругой волны через устье несплошности ничтожно мало, что обеспечивает совершение механической работы с максимально возможной в природе мощностью.

Впервые эта задача была поставлена и частично разрешена в работах автора (6,7). Это позволило создать более сорока изобретений в самых различных областях техники и осуществить промышленное внедрение некоторых из них.

Выводы: 1. Господствующие в механике твердого тела естественнoнаучные представления о сплошности и однородности их объема, а также линейности деформаций исчерпали свою плодотворность и противоречат опыту, согласно которому все без исключения тела несплошны и нелинейны, что необходимо использовать для дальнейшего развития теории и практики.

2. Как показали исследования, несплошности могут быть двух видов - упругосимметричные и упругонесимметричные.

3. Доказано, что упругосимметричная несплошность не изменяет существенно линейности деформаций и согласуется с классическими представлениями. Упругоасимметричная несплошность вызывает излом линейности и создает ранее неизвестное в науке явление вентильного механичес-

кого эффекта, т.е. односторонней проводимости и накопления упругой энергии. В этом случае твердое тело становится энергопреобразователем, т.е. мгновенно может сбрасывать упругую энергию на разрушаясь или совершать полезную работу с требуемой мощностью, а также расходовать ее на саморазрушение.

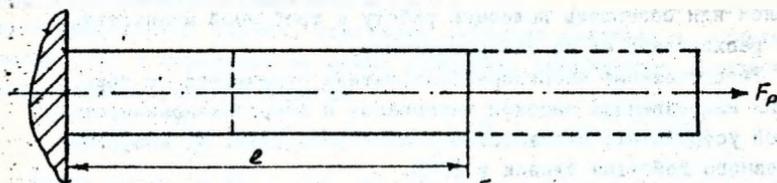
4. Твердотельные энергопреобразователи отличаются от традиционных многозвенных высокой материало- и энергоэкономичностью, простотой устройства, надежностью и долговечностью. Их коэффициент полезного действия близок к 100%.

5. Открытие вентильного механического эффекта в твердых телах является теоретической основой для принципиально нового объяснения развития усталостных трещин, сброса упругой энергии при землетрясениях и практического создания высокоэффективных средств труда.

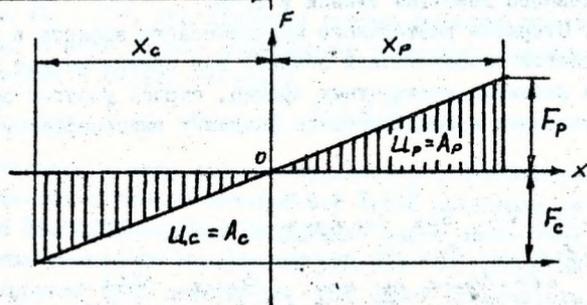
Л и т е р а т у р а

1. *Couchy A.L., Sur les équations qui expriment les conditions d'équilibre ou lois de mouvement intérieures d'un corps solide, élastique ou non, Paris, 1823.*
2. *Robert Hooke, De Potentia restitutiva, London, 1678.*
3. *Inglis G.E., Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Engineering, 1913, vol. 95, no 2465, March 28.*
4. Окладников А.П. К вопросу о происхождении и месте лука в истории культуры// Труды института истории культуры/ М.: - 1940. - Вып.5. - 571-81.
5. Понаморов С.Д. Пружины, их расчет и конструирование. -М.: Машгиз, 1954. - 182с.
6. Трусъ А.М. Исследование упругих несовершенств, динамики и прочности винтовых цилиндрических пружин// Диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Новосибирск. 1964, - 165 с.
7. Трусъ А.М. и др. О передаче механической энергии пружинами// Динамика машин.Сборник. "Машиностроение"/ М.: - 1966, - С.426-436.

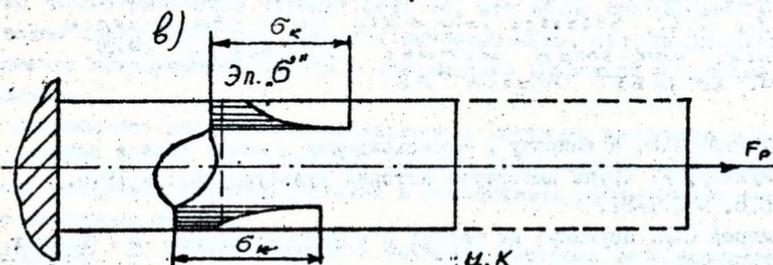
a)



б)



в)



2)

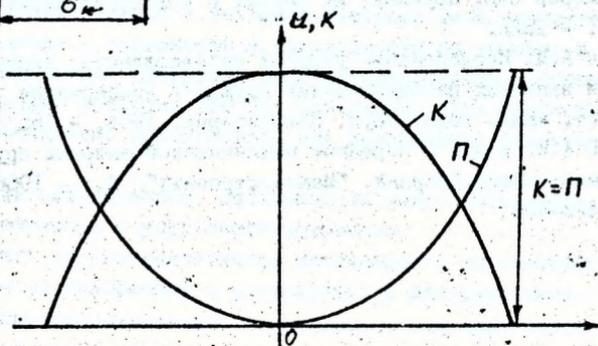
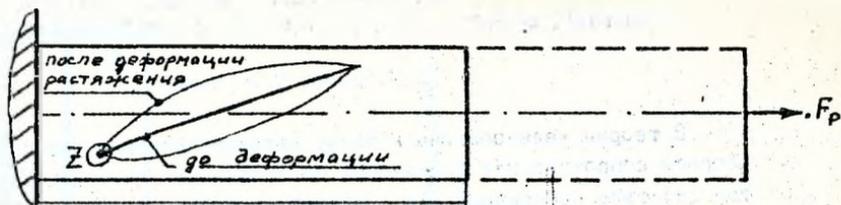


Рис. 1

a)



б)

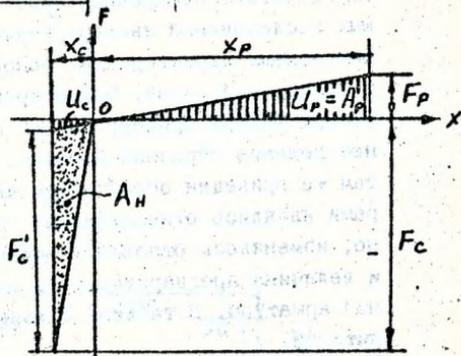
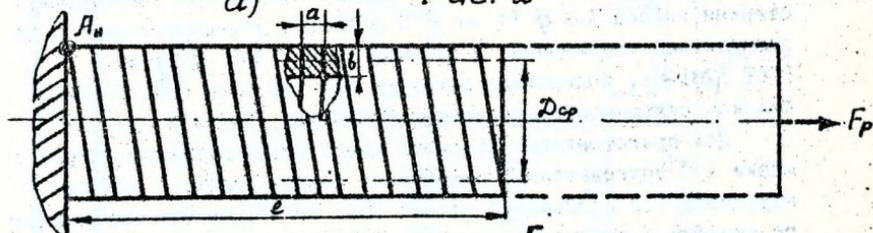


Рис. 2

a)



б)

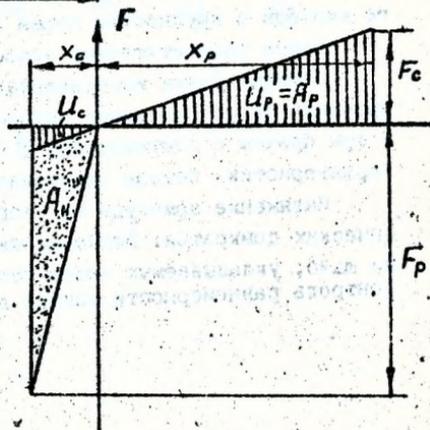


Рис. 3