

О СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫХ УСТРОЙСТВ

В ряде работ [1, 2] отмечалась перспективность предварительно напряжённых устройств (ПНУ). Одной из особенностей ПНУ, состоящих из двух элементов, нагруженных усилиями противоположных знаков, является возможность получения для них ломаной рабочей характеристики с крутой начальной и пологой конечной ветвями (рис.1). Такая характеристика желательна для некоторых конструкций буферов, амортизаторов и демпферов, а также для всех предохранительных устройств, защищающих машины от поломок [3].

Характеристика ПНУ, представленная на рис.1, относится к случаю, когда внешняя нагрузка прикладывается к элементу меньшей жёсткости в сторону увеличения в нём усилия [4]. Эта характеристика является теоретической (получена расчётным путём). Она зависит от соотношения жёсткостей деталей ПНУ. Свойства материала и геометрическая форма деталей идеализированы.

На практике характеристика ПНУ может существенно отличаться от той, которая показана на рис. 1. Рассмотрим причины этих отклонений.

Прежде всего отметим, что теоретическая характеристика получена в предположении, что оба элемента ПНУ идеально упруги и их материал подчиняется закону Гука. На практике всегда есть отклонения от этого допущения. Эти отклонения связаны как с нелинейностью характеристик материала, так и с нелинейностью, вызванной формой детали и видом её деформации.

Затем следует остановиться на том факте, что в ряде предохранителей, например, в предохранительных устройствах (ПУ) с разрушаемыми элементами (РЭ) уровень напряжений даже при отсутствии перегрузов достаточно высок. В процессе работы таких ПУ практически невозможно избежать появления пластических деформаций в РЭ. При этом, если данный РЭ является составной частью ПНУ, то появление в нём пластических деформаций сказывается на характеристике ПНУ.

Следующим фактором, существенно влияющим на вид характеристики, является наличие в ПНУ внутреннего и внешнего трения, приводящего к существенным энергетическим потерям за один цикл нагружения. В этом случае на рабочей характеристике линия нагрузки проходит значительно выше линии разгрузки.

И, наконец, в элементах ПНУ может наблюдаться релаксация усилия предварительного нагружения, связанная с особенностями строения материала нагружаемого элемента. Так, например, у эластомеров релаксация усилий проявляется уже при обычных температурах.

Теперь рассмотрим возможные отклонения в характеристике ПНУ, связанные с нелинейностями. На рис.2 показана фактическая характеристика ПНУ (полученная в процессе испытания образца ПНУ в лабораторных условиях) с элементом меньшей жёсткости в виде пакета последовательно соединённых тарельчатых пружин.

Участок **1 (O₁A)** рабочей характеристики связан с выбором зазоров в системе «ПНУ - испытательная машина». Поскольку ПНУ в заряженном состоянии зазоров не имеет, то участок 1 отражает наличие зазоров в звеньях испытательной машины. На работу ПНУ этот участок влияния не оказывает.

Участок **2 (BC)** - скругление в зоне излома рабочей характеристики. Обнаруживается на всех ПНУ и связано с нелинейной зависимостью местных контактных деформаций от приложенного усилия. На теоретической характеристике этого скругления нет, т.к. теория ПНУ не учитывает наличия местных контактных деформаций. Описанные отклонения от теоретической характеристики не оказывают существенного влияния на работу ПНУ в качестве предохранительного устройства.

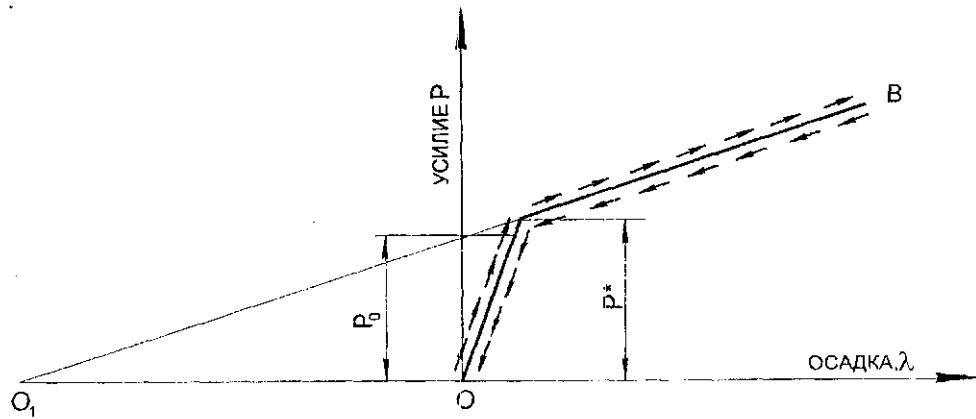


Рис.1. Теоретическая рабочая характеристика ПНУ

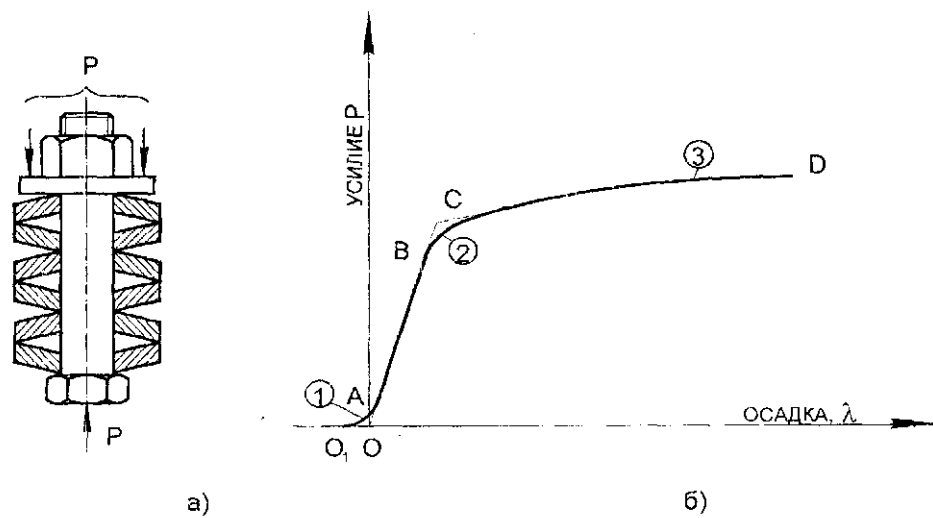


Рис.2. Предварительно напряженное устройство с упругим элементом из тарельчатых пружин:
 а) схема напружения ПНУ;
 б) рабочая характеристика ПНУ

Участок **3** (CD). Нелинейность этого участка принадлежит характеристике упругого элемента меньшей жёсткости (в нашем примере - блока тарельчатых пружин). Отметим, что многие тарельчатые пружины большой жёсткости имеют нелинейную характеристику при больших усилиях (близких к предельно допустимым). Такая нелинейность - важная часть характеристики ПНУ, она легко рассчитывается и прогнозируется. Эта нелинейность устойчива, она сохраняется в процессе работы устройства. К тому же такая нелинейность (выпуклостью вверх) приближает характеристику ПУ к идеальной (у которой второй участок горизонтален) [5].

Для упругих элементов, изготовленных из эластомеров, на рабочей характеристике может наблюдаться нелинейность другого типа — выпуклостью вниз. Это ухудшает характеристику ПНУ как предохранителя.

На рис.3 (а, б) изображены характеристики ПНУ, у которых упругий элемент претерпевает пластические деформации.

Наиболее интересен для практики случай, когда ПНУ представляет собой предохранитель, у которого разрушаемый элемент (выше назван упругим элементом) предварительно нагружен усилием (напряжением), обеспечивающим отсутствие усталостных повреждений [6]. При этом важно обеспечить стабильность такого предварительного нагружения.

Представим себе, что на машине, где установлено ПУ описанного выше типа, произошёл перегруз, недостаточный для разрушения РЭ, но достаточный для появления пластических деформаций в РЭ. На рис.3,а и 3,б это усилие обозначено P^{**} , а полученная при этом пластическая деформация изображается отрезком ВС (одинаковым в вариантах а и б). Стрелками показано нагружение - линия OABC, и разгрузка - линия CDO. При последующих нагружениях усилиями, меньшими P^{**} , характеристики этих ПНУ будут представлены линиями ODC; CDO, т.е. характеристики таких ПНУ изменяются, а именно, уменьшается усилие предварительного нагружения со всеми вытекающими последствиями.

Следует обратить внимание, что при одинаковых пластических деформациях в вариантах а и б (см. рис.3) получается разное изменение характеристики. Начальное усилие затяжки P_n^* (оно же выключающее усилие для ПУ) уменьшается до величин

$P_{\kappa_1}^*$ или $P_{\kappa_2}^*$, причём

$$P_n^* - P_{\kappa_1}^* > P_n^* - P_{\kappa_2}^* \quad (0)$$

Для предохранительного устройства вариант б является более предпочтительным. Это тот вариант, когда падение нагрузки P_n^* несущественно (мало по сравнению с первоначальным усилием P_n^*):

$$P_n^* - P_{\kappa}^* \ll P_n^* \quad (2)$$

Это условие будет выполнено, если выполняется

$$\lambda_{пл} \ll \lambda_{у}, \quad (3)$$

т.е. если пластическая деформация РЭ будет значительно меньше его упругой деформации. Выполнимо ли это условие? На первый взгляд кажется, что оно невыполнимо, т.к. подавляющее большинство РЭ изготавливаются из различных марок сталей, для которых пластическая деформация больше упругой, составляющей доли процента. Последнее обстоятельство вовсе не означает, что следует искать для изготовления РЭ некий особый материал с большими упругими и малыми пластическими деформациями. Этот вопрос может быть решён конструктивным усовершенствованием ПНУ. Так, присоединение к РЭ последовательно упругого элемента большой энергоёмкости (пружины) позволяет эту пару считать одним из элементов ПНУ, причём таким элементом, для которого будет выполнено условие (3), а, следовательно, и условие (2). Такое ПУ обладает необходимым запасом стабильности свойств. Оно может надёжно работать даже при накоплении пластических деформаций в РЭ.

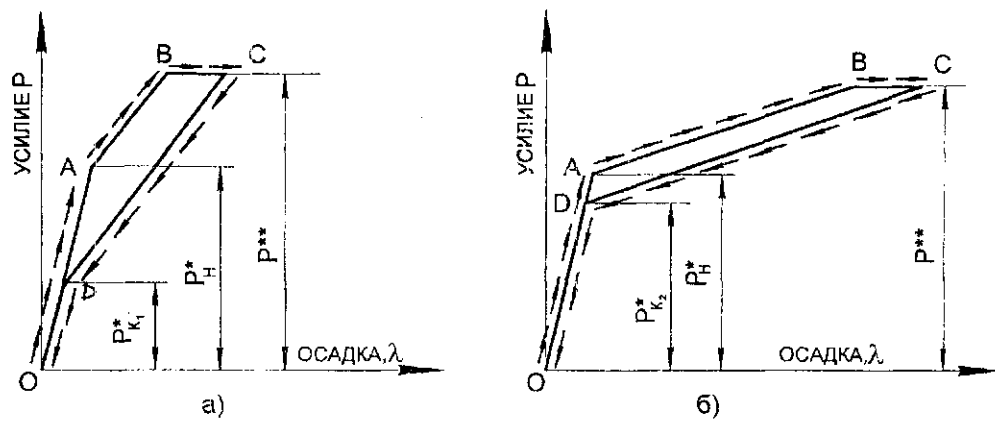


Рис.3. Рабочие характеристики предварительно напряжённых устройств при наличии пластических деформаций:
 а) с РЭ большой жёсткости;
 б) с РЭ малой жёсткости

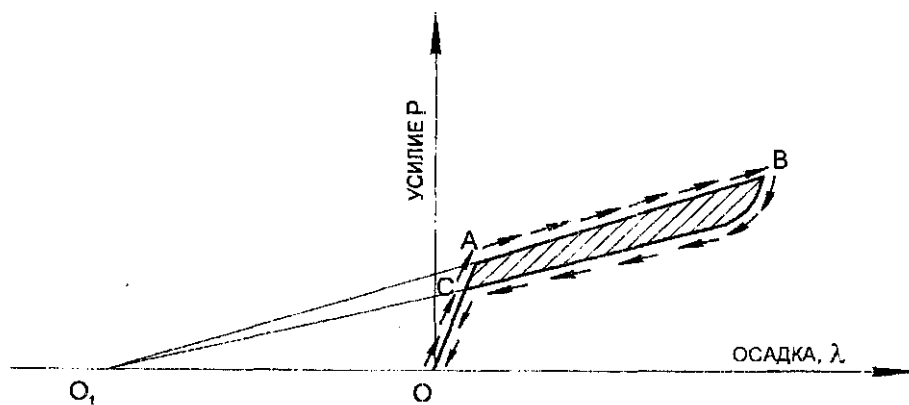


Рис.4. Характеристика предварительно напряжённого устройства, содержащего деталь из эластомера

Далее остановимся на внутреннем и внешнем трении в элементах ПНУ (в первую очередь в том элементе, который содержит РЭ).

Для стальных деталей внутреннее трение настолько мало, что можно смело пренебречь вызванными им энергетическими потерями и изменениями характеристики ПНУ. Однако, кроме стальных деталей, ПНУ может содержать и детали, изготовленные из эластомеров.

Выше отмечалось, что одним из вариантов стабилизации рабочей характеристики ПНУ является последовательное соединение РЭ с энергоёмким упругим элементом (УЭ). Причём, чем больше его энергоёмкость, тем стабильнее характеристика ПУ.

Известно [7], что эластомеры являются рекордсменами по удельной энергоёмкости. По этому параметру они превосходят лучшие пружинные стали, следовательно, их применение в ПНУ, функционально являющихся предохранителями, вполне оправдано.

Вместе с тем, некоторые свойства эластомеров (большое внутреннее трение и релаксационные явления, протекающие при обычных температурах), требуют обязательного учёта и корректировки конструкции.

Наиболее энергоёмкими эластомерами являются литьевые конструкционные полиуретаны, например, СКУ-ПФЛ-70, СКУ-ПФЛ-100 и их зарубежные аналоги adipren L-10Q и adipren L-167. Для подобных эластомеров рассеяние энергии за один цикл нагружения составляет $\psi=20..50\%$. Рабочая характеристика упругого элемента, изготовленного из такого материала, имеет петлю гистерезиса значительных размеров. Это же относится и к характеристике всего ПНУ, имеющего один из элементов, изготовленный из подобного материала.

На рис.4 показана характеристика такого ПНУ, выполняющего роль предохранителя. Особенностью этой характеристики является то, что нагружение и разгрузка ПНУ изображаются разными отрезками: нагружение - ОАВ, а разгрузка - ВСО. При этом заштрихованная площадь (площадь петли АВСО) отражает работу сил внутреннего трения (потери, превращенные в тепло). Характеристика сохраняется при последующих нагружениях, т.е. выключающая нагрузка остаётся стабильной.

Таким образом, внутреннее трение не влияет отрицательно на рабочую характеристику, если перегрузки происходят не часто, и, следовательно, полученное за счёт внутреннего трения тепло успевают отводиться от упругого элемента. В противном случае перегрев упругого элемента может привести к необратимому изменению свойств его материала.

Рассмотрим далее влияние внешнего трения. Наличие элементов внешнего трения диктуется конструктивными особенностями ПНУ. Наиболее часто встречаются две причины появления элементов внешнего трения:

1. Упругий элемент ПНУ представляет собой слоёнку из упругих дисков, изготовленных из эластомера, и жёстких стальных дисков, препятствующих радиальной деформации УЭ и, тем самым, повышающих его жёсткость.
2. Упругий элемент ПУ набран из тарельчатых пружин, соединённых параллельно или при помощи промежуточных жёстких пластин, также препятствующих свободной радиальной деформации.

На рис.5 показана рабочая характеристика такого ПНУ. Линия O_1MK представляет собой характеристику упругого элемента при отсутствии трения, а замкнутый контур $O_1ABCD O_1$ - характеристику того же упругого элемента, но при наличии пары трения. Контур $OABCD$ изображает характеристику всего ПНУ с упругим элементом, имеющим пару трения.

Площадь замкнутого контура $DABC$ представляет собой работу пары трения за один цикл нагружения. Эта работа переходит в тепло, которое должно быть рассеяно. Характеристика такого устройства остаётся стабильной, если стабильными будут условия трения в трущейся паре. Последнее условие выдержать на практике трудно, поэтому наличие внешнего трения в ПНУ, используемых как предохранители, нежелательно.

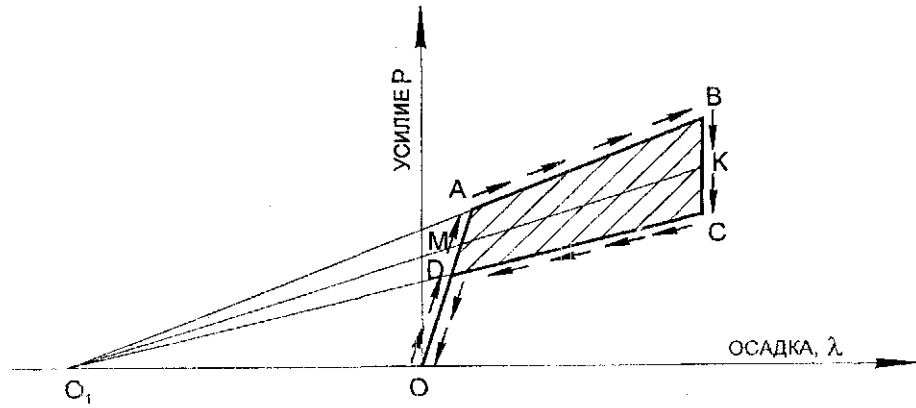


Рис.5. Характеристика предварительно напряжённого устройства с элементом, имеющим пару трения

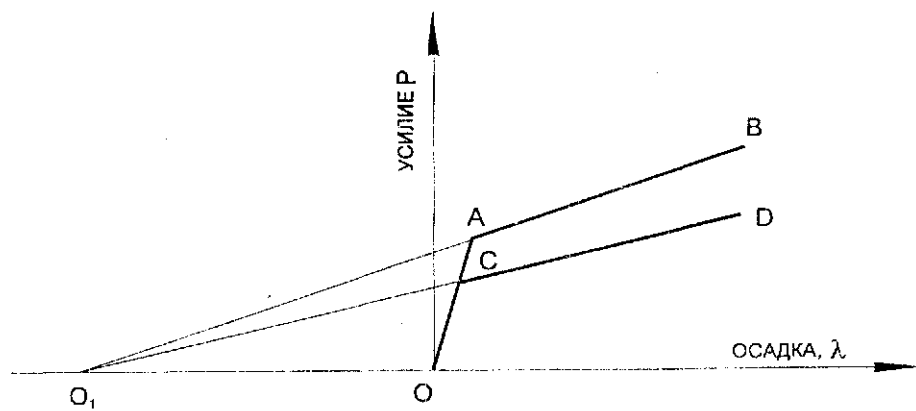


Рис.6. Характеристики предварительно напряжённого устройства с упругим элементом, подверженным релаксации

Рассмотрим, наконец, влияние на рабочую характеристику релаксации усилия предварительной затяжки ПНУ, вызванной свойствами материала УЭ. При этом отметим, что в стальных УЭ при обычных температурах (температура эксплуатации металлургического оборудования $t < 300\text{C}$ в подавляющем большинстве случаев) релаксации не наблюдается. Однако, в случае применения в качестве материала упругих элементов эластомеров, релаксация усилия предварительной затяжки происходит постоянно и может достичь значительной величины даже при неработающем устройстве. На рис.6 показана рабочая характеристика такого ПНУ. Ломаная ОАВ изображает первоначальную рабочую характеристику, а ломаная ОСВ - новую характеристику, которой ПНУ обладает после релаксации усилия затяжки.

Падение усилия предварительной затяжки (оно же - выключающее усилие) может достигнуть величины 25...30%. Уменьшить релаксацию можно соответствующим подбором материала (имеются марки полиуретанов с максимальной релаксацией 8... 12%). Кроме того, стабилизировать выключающее усилие можно повторной подзарядкой ПНУ до требуемого нормативного уровня.

ВЫВОДЫ

1. Стабильность выключающего усилия ПУ с РЭ в случае применения предварительного напряжения РЭ зависит от многих факторов, и, прежде всего, от энергоёмкости упругих элементов ПНУ, наличия внешнего трения и релаксации усилия предварительного нагружения.
2. Для особо точных ПУ нужно исключить внешнее трение и релаксацию, а влияние пластических деформаций РЭ на характеристику ПУ свести к минимуму путём установки упругого элемента максимальной энергоёмкости, профилактической замене РЭ или автоматической подзарядке ПНУ с уменьшающимся усилием затяжки P_n^* .

Перечень ссылок

1. *Артюх В.Г.* Применение предварительно напряжённых пар в качестве предохранителей металлургических машин // Защита металлургических машин от поломок.- Мариуполь, 1997.- Вып.2.- С.69-89.
2. *Артюх В.Г.* Повышение усталостной прочности разрушающихся элементов предохранителей // Вестник ПГТУ.- Мариуполь, 1996,- Вып.2.- С. 123-125.
3. *Артюх В.Г.* К вопросу выбора рабочей характеристики предохранительного устройства // Придніпровський науковий вісник: Машинобудування та технічні науки.- 1997,- №35 (46).- С.22-24.
4. *Артюх В.Г.* Предварительно напряжённая пара как элемент предохранительного устройства // Вестник ПГТУ.- Мариуполь, 1997.- Вып.3.- С.120-123.
5. *Артюх В.Г.* Особенности предварительного напряжения расходуемых элементов предохранительных устройств // Защита металлургических машин от поломок.- Мариуполь, 1998.- Вып.3.- С.40-46.
6. *Артюх Г.В.* Особенности применения эластомеров для снижения динамических нагрузок в металлургических машинах // Защита металлургических машин от поломок.- Мариуполь, 1998.- Вып.3.- С.155-158.
7. *Артюх Г.В.* Энергоёмкость полиуретановых амортизаторов // Защита металлургических машин от поломок.- Мариуполь, 1999,- Вып.4.- С.166-172.

Статья поступила 06.10.2000.