

## **Оборудование для испытания листовых конструкционных материалов при двухосном растяжении. Сообщение 2. Испытания двухосным нагружением в плоскости листа**

**Н. Р. Музыка**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Рассмотрены конструктивные особенности оборудования для механических испытаний листовых конструкционных материалов в условиях двухосного статического, циклического и динамического нагружения. Предложены оригинальные решения проблем, связанных с проведением усталостных испытаний крестообразных образцов без применения сложных гидравлических систем и динамических испытаний с использованием простейших испытательных машин на одноосное растяжение–сжатие.*

**Ключевые слова:** листовые материалы, крестообразный образец, реверсор, двухосное циклическое нагружение, двухосное динамическое нагружение.

Наиболее полную информацию о прочности и трещиностойкости листовых материалов дают испытания плоских крестообразных образцов при нагружении в плоскости листа.

Однако многие задачи, которые относятся к области конструкционной прочности материалов, подвергающихся действию двухосного нагружения, остаются нерешенными ввиду отсутствия оборудования, обеспечивающего необходимое термосиловое нагружение испытуемого образца. Немногочисленные сведения о конструкциях установок для испытаний крестообразных образцов [1, 2] объясняются сложностью решения вопросов методического характера: обеспечение режимов силового нагружения образца, температурных режимов и др. Так, при испытании крестообразного образца основная трудность состоит в обеспечении неизменности положения его центра при деформировании, что связано с необходимостью синхронизации перемещения захватов, расположенных по одной из главных осей образца, относительно центра. Не менее сложно достичь пропорциональности и равенства прикладываемых нагрузок к каждому лепестку образца, расположенных по одной из его осей.

Установки для испытаний крестообразного образца серийно не выпускаются, а изготовить их в неспециализированных предприятиях, учитывая нерешенность вышеуказанных вопросов методического характера, довольно сложно. В этой связи широкое распространение получили реверсоры, позволяющие на испытательной машине, предназначенной для испытаний образцов на одноосное растяжение, проводить испытания крестообразного образца при равномерном двухосном растяжении [3]. Недостатком известных реверсоров является нарушение пропорциональности нагружения образца в процессе его деформирования вследствие изменения углов наклона рычагов к плоскости образца, а также невозможность реализовать неравномерное двухосное растяжение.

Для ряда материалов и элементов конструкций представляется актуальным исследовать влияние касательных напряжений на процесс разрушения при двухосном растяжении. На рис. 1 показана схема приспособления к обычной испытательной машине для одноосного растяжения образцов, обеспечивающего проведение испытаний пластин на двухосное растяжение при пропорциональном перемещении захватов образца [4].

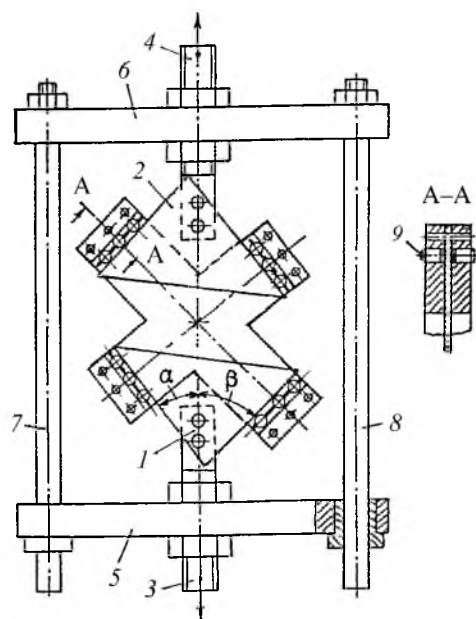


Рис. 1. Схема устройства для испытания крестообразного образца при пропорциональном перемещении захватов.

Крестообразный образец, на лепестках которого закреплены упоры, устанавливается между двумя парами плоских жестких элементов 1 и 2, соединенных с тягами 3 и 4, которые несут планки 5 и 6, размещенные на направляющих 7 и 8. Для испытаний пластин при равномерном двухосном нагружении применяются крестообразные образцы со взаимно перпендикулярным расположением пар лепестков, когда главные оси совпадают с осями образца, а при испытаниях с различным соотношением главных напряжений – крестообразные образцы с ориентацией пар лепестков под углом друг к другу. В этом случае нагружение проводится с поворотом главных осей [3]. Угол между осями крестообразного образца равен сумме углов  $\alpha$  и  $\beta$  наклона поверхностей боковых сторон плоского элемента к оси тяг. Для равномерного двухосного растяжения  $\alpha = \beta$ . Неизменность углов  $\alpha$  и  $\beta$  обеспечивает пропорциональность перемещения захватов образца в процессе его нагружения. Силы трения, действующие на лепестках испытуемого образца при перемещении боковых сторон плоских элементов по опорным поверхностям захватов образца, приводят к отклонению направления прикладываемых нагрузок относительно его осей на угол  $\gamma$ :  $\operatorname{tg} \gamma = f / \sqrt{1 + f^2}$ , где  $f$  – коэффициент трения скольжения. Для уменьшения сил трения на рабочих поверхностях плоских элементов размещаются ролики 9, установленные в

сепараторы. Кроме того, уменьшить влияние сил трения можно путем изменения углов  $\alpha$  и  $\beta$  на величину угла  $\varphi$  трения, определяемого из известного выражения:  $f = \operatorname{tg} \varphi$ .

Особый интерес представляют циклические испытания листовых материалов при двухосном растяжении с различной степенью двухосности. Известные единичные установки для проведения подобных испытаний содержат сложные гидравлические нагружающие системы [5].

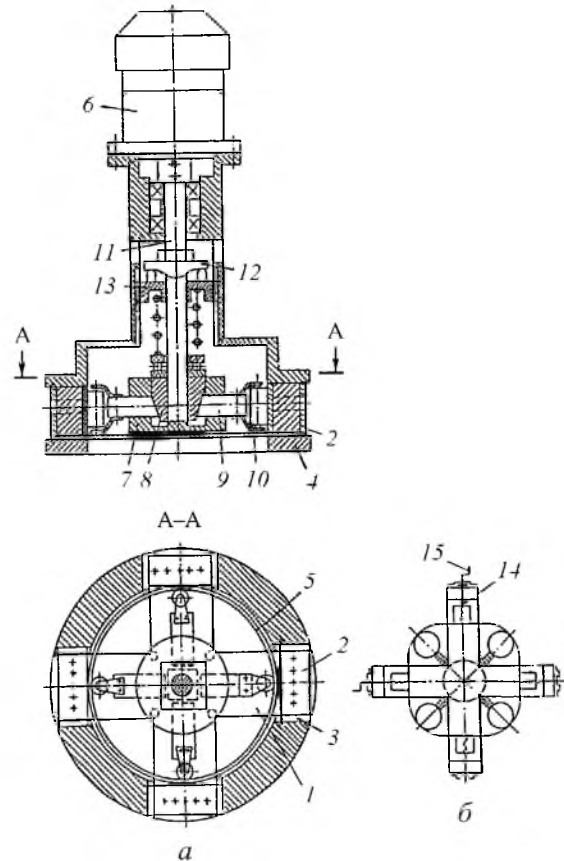


Рис. 2. Схема устройства для циклических испытаний крестообразного образца: *а* – разрез по сечению А–А; *б* – схема асимметричного цикла нагружения.

На рис. 2, *а* приведена схема установки, позволяющей достаточно просто реализовать знакопостоянный и знакопеременный циклы нагружения крестообразного образца по заданной программе, на рис. 2, *б* – схема установки для асимметричного цикла испытаний предварительно нагруженного крестообразного образца [6]. Образец 1 жестко закрепляется в захватах 2, размещенных на направляющих 3 корпуса 4. Нагружение образца осуществляется с помощью упругого кольца 5, внутри которого установлен вращающийся от привода 6 ротор 7. Ротор снабжен клиновым разжимным элементом 8, взаимодействующим с ползунами 9, нажимные ролики 10 которого контактируют с внутренней поверхностью упругого кольца. На валу 11 ротора размещено устройство для сообщения клиновому разжимному эле-

менту осевых колебаний, выполненное в виде торцевого кулачка 12 и подпружиненного толкателя 13. Торцевой кулачок, вращаясь от привода, перемещает толкатель циклически с заданной амплитудой перемещений, передавая усилие на нажимные ролики. Последние, обкатываясь по внутренней поверхности упругого кольца, деформируют его и возбуждают в нем волну радиальных перемещений. При этом циклические напряжения с переменной амплитудой создаются в образце вследствие различных углов наклона рабочих плоскостей клинового разжимного элемента. В частности, выполнение клинового разжимного элемента в виде усеченной четырехгранной пирамиды, углы наклона плоскостей которой, расположенные по одной оси образца, отличаются от углов наклона плоскостей, расположенных по другой оси, позволяет создавать в рабочей части крестообразного образца напряжения, амплитуда которых изменяется дважды за один оборот ротора. При испытаниях образца в условиях знакопостоянного цикла нагружения упругое кольцо свободно контактирует с захватами образца, а для реализации испытаний при знакопеременном цикле нагружения оно скрепляется с захватами образца. В последнем случае при повороте нажимных роликов в положение, совпадающее с осями крестообразного образца, последний подвергается двухосному растяжению. При дальнейшем повороте нажимных роликов на угол  $45^\circ$  образец будет подвержен двухосному сжатию.

Для проведения циклических испытаний предварительно нагруженного заданным усилием крестообразного образца упругое кольцо прикрепляется к резьбовым ползунам 14 (рис. 2,б), связанным с лепестками образца и имеющим возможность перемещаться с помощью винтов 15, установленных на захватах образца. Образец предварительно статически нагружается требуемым усилием путем сжатия упругого кольца в двух направлениях винтами 15. При повороте нажимных роликов в положение, совпадающее с осями образца, последний подвергается нагружению по его осям растягивающими усилиями заданной величины, при повороте на угол  $45^\circ$  он будет подвержен первоначальному статическому растяжению.

При усталостных испытаниях листовых материалов весьма актуальной задачей является обеспечение наряду с режимами нагружения крестообразного образца заданной нагрузкой также нагружение путем заданного перемещения лепестков. Схема такого устройства показана на рис. 3 [7].

Крестообразный образец скрепляется с захватами, несущими втулки 1, внутри которых размещены дифференциальные винты 2, имеющие участки резьбы 3 и 4 с разными шагами. Образец нагружается с помощью механизма, выполненного в виде диска 5 с пазами, где размещены пальцы шатунов 6, приводимого в движение возбудителем колебаний 7. При проведении циклических испытаний образца с заданным перемещением лепестков дифференциальные винты своими резьбовыми участками соединяются с захватами. Ввиду того что шаг резьбы этих участков различный, вращением винтов производится начальное статическое деформирование образца. В зависимости от того, какая из резьб будет иметь больший шаг, образец можно подвергать или предварительному сжатию, или растяжению. Испытания образца с заданной нагрузкой осуществляются путем деформирования упругих элементов, при этом дифференциальные винты выводятся из соединения с захватами образца.

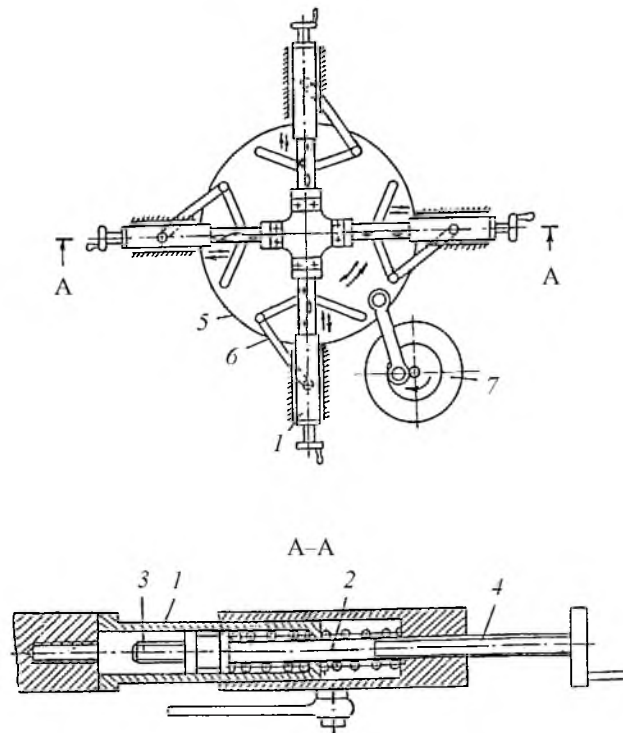


Рис. 3. Схема установки для усталостных испытаний листовых материалов на двухосное растяжение.

Большой интерес представляют испытания листовых материалов в условиях двухосного динамического нагружения. На рис. 4 показана схема устройства, позволяющего проводить испытания крестообразных образцов на двухосное растяжение при импульсном нагружении с использованием обычной испытательной машины на одноосное растяжение, а на рис. 5 – схема устройства для реализации импульсного нагружения указанных образцов растяжением по одной оси с одновременным сжатием по другой [8]. Представленное на рис. 4 устройство содержит реверсор, выполненный в виде плоского шарнирного многоугольника 1, захваты 2–5 с пальцами 6 для крепления испытуемого образца 7 и скрепленные с реверсором упругие элементы 8 и 9 большой жесткости, предназначенные для соединения с захватами обычной испытательной машины. Параллельно испытуемому образцу в его захватах жестко закреплен разрушаемый элемент 10 со сквозной трещиной, выполненный в виде плоской пластины из хрупкого материала. Испытуемый образец установлен свободно в захватах с зазором между крепежными отверстиями в лепестках образца и пальцами захватов. При приложении нагрузки к захватам образца нагружается только разрушаемый элемент, в то время как испытуемый образец не нагружается. По исчерпанию несущей способности разрушаемого элемента последний разрушается с большой скоростью по концентратору, запасенная разрушаемым элементом и упругими элементами энергия высвобождается. При этом нагрузка мгновенно передается испытуемому образцу, вследствие чего про-

исходит деформирование с высокой скоростью. Выполнение концентратора напряжений в разрушаемом элементе позволяет контролировать величину нагрузки и предотвращает его разрушение по крепежным отверстиям, которое сложно контролировать.

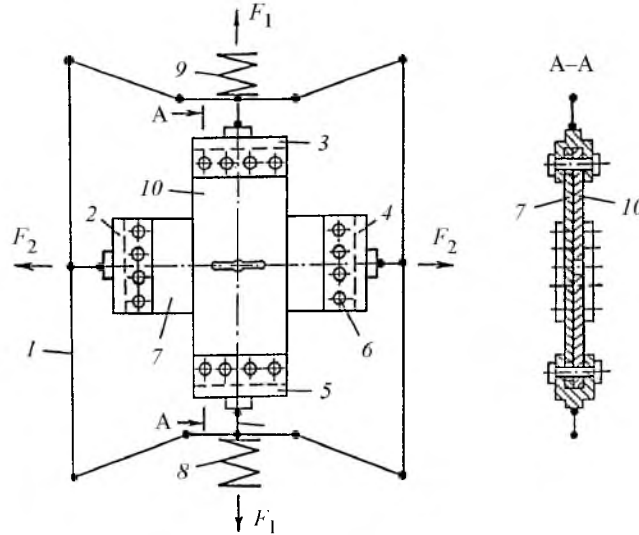


Рис. 4. Схема устройства для испытания крестообразного образца в условиях динамического растяжения.

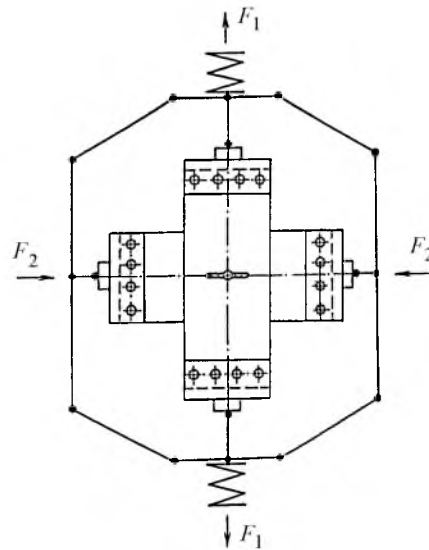


Рис. 5. Схема устройства для испытания крестообразного образца в условиях динамического растяжения по одной оси с одновременным сжатием по другой.

При испытаниях крестообразного образца, конструктивные параметры которого могут привести к потере устойчивости, последний размещается между двумя жесткими накладками, скрепленными с колоннами испытательной установки. Поверхности контактирования накладок с образцом и разрушаемым элементом покрываются графитовой смазкой.

Упругие элементы 8 и 9 должны обладать большой крутизной характеристики и наряду с этим их рабочий ход должен превышать удлинение образца. Рассмотрим работу упругих элементов. К упругим элементам, предварительно растянутым на величину  $\lambda_0$  силой  $N_0$  испытательной машины и удерживаемым разрушаемым элементом, присоединено устройство с захватами для образца массой  $P$ . При исчерпании несущей способности разрушаемого элемента время перемещения захвата в пределах зазора  $l$  размещения пальцев захвата в крепежных отверстиях образца определяется из выражения [9]

$$t = 0,00111 \sqrt{\frac{P\lambda_0}{N_0}} \psi^0, \text{ с,}$$

где параметр  $\psi^0 = \frac{180}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{l}{2\lambda_0}}$ ;  $P$  – масса захвата и присоединенных к нему элементов устройства, кг;  $\lambda_0$  – осадка пружины, м;  $N_0$  – сила, прикладываемая к реверсору, Н;  $l$  – перемещение захвата от момента исчерпания несущей способности разрушаемого элемента до момента его контактирования с образцом, м.

Учитывая, что сила  $N_0$  растяжения пружины и ее жесткость  $Z$  находятся в соотношении

$$N_0 = Z \lambda_0,$$

получаем

$$t = 0,00111 \psi^0 \sqrt{\frac{P}{Z}}.$$

Отсюда видно, что увеличение жесткости упругих элементов позволяет уменьшить время перемещения захватов образца, а следовательно, повысить скорость деформирования образца за счет высвобождения с высокой скоростью в момент исчерпания несущей способности разрушаемого элемента накопленной энергии. Регулируя величину зазора между пальцами захватов и образцом, можно изменять скорость захватов в момент контактирования их с образцом. Максимальная скорость  $V$  захватов определяется из выражения

$$V = An, \text{ м/с,}$$

где

$$n = \sqrt{\frac{N_0 g}{P\lambda_0}}; \quad A = \frac{N_0 - P}{N_0} \lambda_0;$$

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

При проведении испытаний предварительно нагруженного образца в условиях динамического нагружения крепежные пальцы захватов размещаются без зазора в крепежных отверстиях образца. Деформация испытуемого образца сопровождается деформацией разрушаемого элемента, при этом в образце возникают начальные напряжения, величина которых про-

порциональна величине упругой податливости разрушаемого элемента. По достижении предельной нагрузки этот элемент хрупко разрушается, при этом накопленная упругая энергия передается предварительно нагруженному образцу. Изменяя длину трещины и угол ее наклона к вектору нагрузки, можно изменять уровень начальных напряжений в образце.

На рис. 6 показана схема устройства для динамического нагружения крестообразного образца, в котором в качестве силовонагружающего устройства используется обычный пресс. Испытуемый крестообразный образец, по одной оси которого размещен разрушаемый элемент из хрупкого материала с концентратором, соединен посредством упругих элементов растяжения с шарнирными узлами двух параллелограммов, связанных пружинами сжатия с захватами пресса. Если длина рычагов одного из параллелограммов отличается от другого, то, изменяя угол наклона рычагов к плоскости образца, можно проводить динамические испытания образца на двухосное растяжение при заданном соотношении главных напряжений в его рабочей части, а соотношение начальных напряжений устанавливается путем регулирования жесткости упругих элементов растяжения.

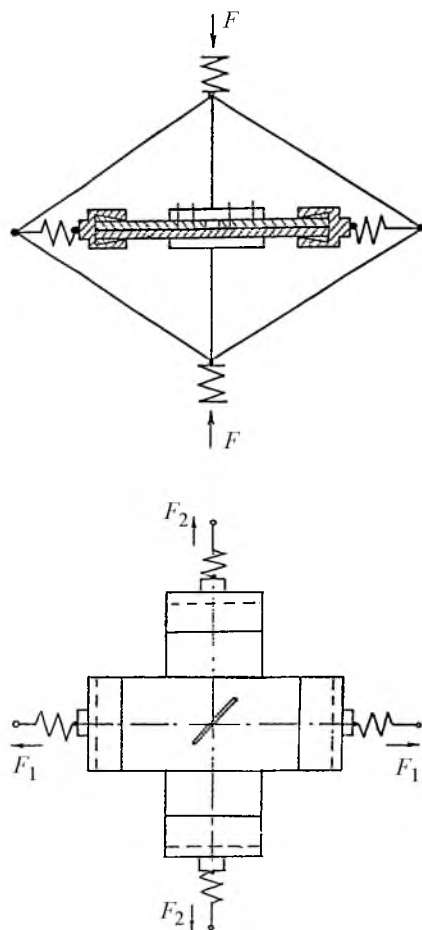


Рис. 6. Схема устройства для динамического нагружения крестообразного образца с помощью пресса.



Рассмотренные решения ряда проблем методического характера, с которыми сталкиваются экспериментаторы, позволяют максимально приблизить условия испытаний образцов к условиям эксплуатации листовых материалов по виду напряженного состояния и характеру приложения нагрузки. В качестве силонагружающих устройств можно использовать простейшие испытательные установки, предназначенные для реализации одноосного нагружения образца. Это позволяет достаточно просто проводить трудоемкие исследования листовых материалов при двухосном нагружении практически в любой лаборатории механических испытаний материалов.

## Резюме

Розглянуто конструктивні особливості устаткування для механічних випробувань листових конструкційних матеріалів в умовах двовісного статичного, циклічного та динамічного навантаження. Запропоновано оригінальні розв'язки ряду проблем, що пов'язані з використанням хрестоподібних зразків для випробувань на втому без застосування складних гідравлічних систем та для динамічних випробувань за допомогою найпростіших випробувальних машин на одновісний розтяг–стиск.

1. *Методы испытаний, контроля и исследования машиностроительных материалов* / Под ред. А. Т. Туманова. Т. 2. Методы исследования механических свойств материалов. – М: Машиностроение, 1974. – 320 с.
2. *Испытательная техника. Справочник: В 2-х кн.* / Под ред. В. В. Клюева. – М: Машиностроение, 1982. – Кн. 2. – 560 с.
3. *Лебедев А. А.* Методы механических испытаний материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 145 с.
4. *А. с. 769399 СССР* МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/08. Устройство для испытания плоских крестообразных образцов на двухосное растяжение / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка. – Оpubл. 13. 12. 80, Бюл. № 37.
5. *Parsons M. W. and Pasoe K. J.* Development of a biaxial fatigue testing rig // *J. Strain Analysis.* – 1975. – **10**, No. 1. – P. 1 – 9.
6. *А. с. 953517 СССР* МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/34. Установка для испытаний материалов на усталость при двухосном растяжении / Н. Р. Музыка. – Оpubл. 25. 08. 82, Бюл. № 37.
7. *А. с. 953515 СССР* МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/32, G01 N 3/08. Устройство для определения усталостных свойств материала при двухосном нагружении / Н. Р. Музыка. – Оpubл. 23. 08. 82, Бюл. № 31.
8. *А. с. 1633334 СССР* МКИ<sup>3</sup> G01 N 3/32. Устройство для испытаний образцов материалов на двухосное нагружение / А. В. Бойко, Н. Р. Музыка. – Оpubл. 07. 03. 91, Бюл. № 9.
9. *Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник: Т. 2* / Под ред. Н. С. Ачеркана. – М: Машиностроение, 1968. – 408 с.

Поступила 04. 09. 2000