

## МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

С.В. Цветков<sup>1</sup>Г.Г. Кулиш<sup>1,2</sup>А.А. Смердов<sup>2</sup>

asmerdov@mail.ru

А.Н. Барышев<sup>1</sup>С.В. Тащилов<sup>3</sup>И.В. Магнитский<sup>3</sup>К.А. Пономарёв<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, пос. Орево, Дмитровский р-н, Московская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> ОАО «Композит», г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

### Аннотация

Рассмотрена необходимость проведения исследований материалов при сложном напряженном состоянии. Отмечены проблемы, возникающие при проведении испытаний на трехосное растяжение, а также отсутствие стандартных образцов и методик для подобных испытаний. Сформулированы требования к конструкции образца для испытаний на равномерное трехосное растяжение и к испытательной установке. Предложен образец для испытаний на трехосное растяжение. Проведено моделирование эксперимента методом конечных элементов. Даны рекомендации по выбору формы и размеров образца. Описана экспериментальная установка. Приведены данные экспериментов, выполненных на образцах из полиметилметакрилата

### Ключевые слова

*Трехосное растяжение, сложное напряженное состояние, численное моделирование, образец для испытаний, испытательная установка, полиметилметакрилат*

Поступила в редакцию 28.09.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Экспериментальные исследования поведения материалов при сложном напряженном состоянии необходимы для наиболее полного описания их механических и физических свойств. Наиболее сложными являются эксперименты при трехосном (объемном) напряженном состоянии. Во многих случаях сложное напряженное состояние, определяемое тензором напряжений  $\sigma_{ij}$ , удобно представлять в виде суммы двух напряженных состояний:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + t_{ij},$$

где  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}$  — девиатор,  $\delta_{ij}$  — единичный тензор;  $t_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij}$  — шаровой тензор,  $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{ij}$ .

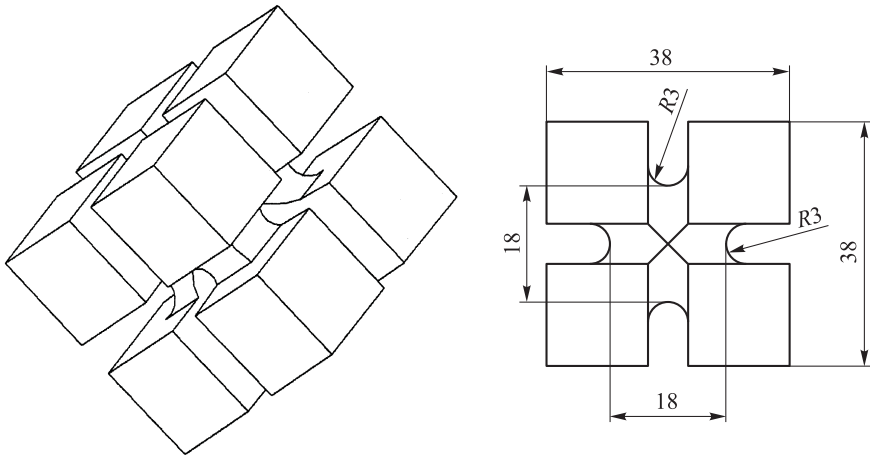
При проведении экспериментов для получения различных трехосных напряженных состояний обычно изменяют параметр  $\sigma_0$ . Как правило, такие

эксперименты проводят в условиях высоких давлений, при этом  $\sigma_0$  имеет отрицательное значение. Гидравлические исследовательские установки позволяют получать давления до нескольких сотен мегапаскалей, установки типа наковален Бриджмена — до нескольких тысяч мегапаскалей. В условиях высоких давлений исследовали многие свойства материалов: упругие и прочностные характеристики, фазовые переходы, электрическое сопротивление, диэлектрическую проницаемость и др. [1, 2]. Данные эксперименты позволили обнаружить многие интересные эффекты. Результаты исследования деформирования и разрушения материалов в условиях высоких давлений показали, например, что для многих изотропных металлов пределы текучести и прочности не зависят от  $\sigma_0$ . Этот факт лег в основу классических теорий прочности и пластичности изотропных материалов. В результате экспериментов выявили, что изотропные металлы, хрупкие при атмосферном давлении, в условиях высокого давления проявляют пластические свойства. У однонаправленных композиционных материалов, нагружаемых вдоль направления армирования на растяжение, с возрастанием наложенного гидростатического давления дисперсный вид разрушения изменяется на локальный [3]. В условиях высокого давления возможны фазовые превращения в веществе — в результате меняются его свойства. Наиболее известный факт такого рода — превращение углерода в алмаз [2].

Значительно меньше исследований проведено при трехосном растяжении образцов материалов, т. е. при положительных значениях параметра  $\sigma_0$ . Методика таких испытаний отработана недостаточно. Есть только отдельные публикации по этой теме. В работе [4] описана экспериментальная установка для создания трехосного напряженного состояния в материале кубических образцов. Проанализировано распределение напряжений в кубическом образце, приведены данные экспериментов циклического нагружения материала в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В работе [5] приведена конструкция экспериментальной установки для испытания крестообразных образцов при трехосном напряженном состоянии. Крестообразные образцы используются, как правило, для создания двухосного напряженного состояния [6–8]. Установки для таких испытаний при соответствующей модернизации могут применяться для трехосных испытаний.

В настоящей работе рассматривается конструкция установки для испытаний образцов при трехосном напряженном состоянии. Для испытаний предлагаются образцы кубической формы. Проведенное методом конечных элементов исследование распределения напряжений при равномерном трехосном растяжении показывает наличие концентрации напряжений в некоторых зонах. В связи с этим рассмотрены возможные изменения в конструкции образцов, позволяющие уменьшить концентрацию напряжений.

**Техника эксперимента.** Чертеж образца (куб  $38 \times 38 \times 38$  мм [9]), предназначенного для испытаний на трехосное растяжение, представлен на рис. 1. На каждой грани куба имеется по два взаимно перпендикулярных пропила. Образец нагружается с помощью уголков захватов, которые входят в эти пропилы.

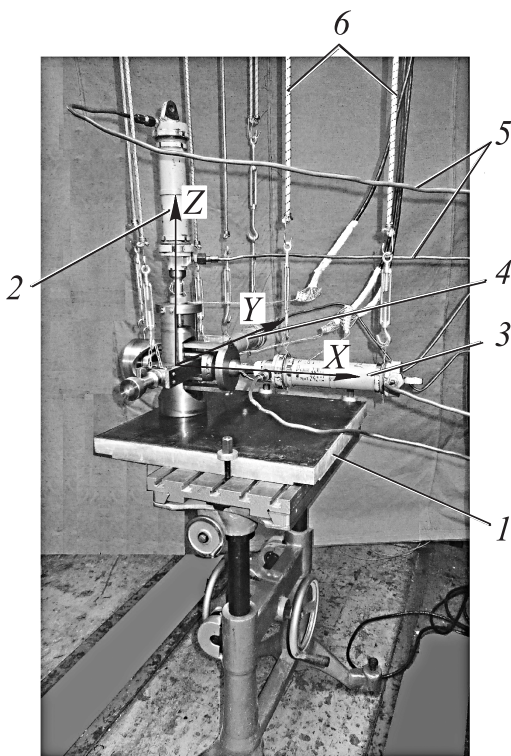


**Рис. 1.** Образец для испытаний на трехосное растяжение

В установках для двух- и трехосного нагружения образцов [4, 5, 7, 8] считается необходимым, чтобы линии действия сил, нагружающих образец, проходили через центр образца. Для этого в таких установках центр образца при нагружении стараются оставить неподвижным. Силы прикладываются вдоль каждой из трех взаимно перпендикулярных осей с помощью двух электрических [5] или гидравлических [7] приводов. Каждый привод снабжен датчиками сил и перемещений. Электронная система управления задает нужное изменение нагрузки, действующей на образец, и обеспечивает неподвижность центра образца.

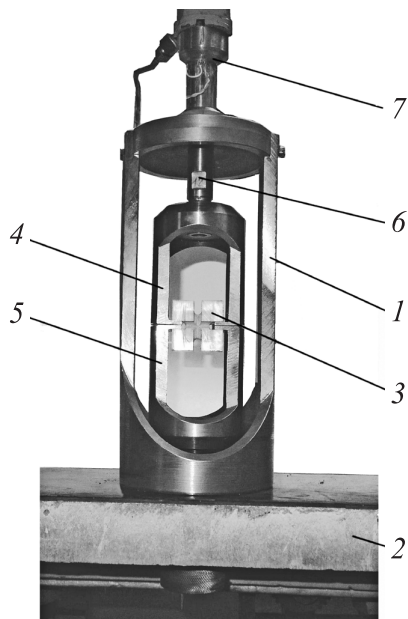
На рис. 2 показана разработанная авторами установка для испытаний на трехосное растяжение в сборе. Установка состоит из трех нагрузочных устройств по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . На станине 1 жестко закреплено вертикальное нагрузочное устройство 2 по оси  $Z$ . Горизонтальные нагрузочные устройства 3 и 4 по осям  $X$  и  $Y$  крепятся непосредственно на образце. Для того чтобы масса нагрузочных устройств не влияла на деформирование образца, устройства  $X$  и  $Y$  «обезвешиваются» и выставляются по уровню в горизонтальной плоскости. Роль упругих подвесов выполняют резиновые амортизаторы 6 и упругие гибкие медные трубопроводы 5, по которым подается давление в гидроцилиндры. Поскольку нагрузочные устройства жестко связаны только с образцом, при нагружении они не вызывают смещения центра образца в горизонтальном направлении. При нагружении образца в вертикальном направлении центр образца смещается вверх и вместе с этим перемещаются горизонтальные нагрузочные устройства. Жесткость подвесов мала, поэтому небольшое смещение горизонтальных нагрузочных устройств по вертикальной оси не вызывает существенных дополнительных нагрузок на образец.

На рис. 3 показано вертикальное неподвижное нагрузочное устройство по оси  $Z$ . Корпус устройства 1 жестко закреплен на станине 2. Кубический образец 3 помещается в захваты 4 и 5. Неподвижный захват 5 соединен со станиной, а по



**Рис. 2.** Установка для испытаний на трехосное растяжение:

1 — станина; 2 — вертикальное нагрузочное устройство; 3 и 4 — горизонтальные нагрузочные устройства по осям X и Y; 5 — трубопроводы; 6 — упругие подвесы

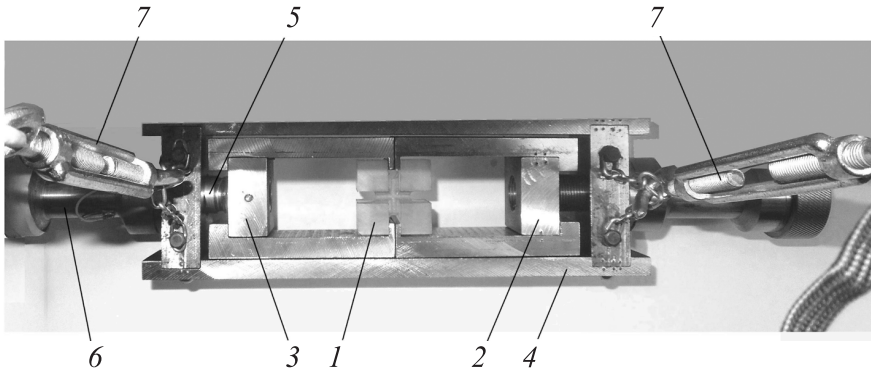


**Рис. 3.** Вертикальное нагрузочное устройство:

1 — корпус устройства; 2 — станина; 3 — образец для испытаний; 4 и 5 — подвижный и неподвижный захваты; 6 — шток гидроцилиндра; 7 — датчик сил

движный 4 — со штоком гидроцилиндра 6. Шток свободно проходит через отверстие в корпусе устройства. На штоке помещается датчик сил 7. Применяемые в установке датчики представляют собой втулки с наклеенными на них тензорезисторами. Втулки могут без трения перемещаться по штоку гидроцилиндра. Для нагружения образца в гидроцилиндр подается давление, которое перемещает шток вовнутрь гидроцилиндра (вверх). При этом корпус гидроцилиндра упирается в датчик силы, и подвижный захват перемещается вверх, нагружая образец на растяжение. При этом вверх перемещается и центр образца.

Конструкция устройства по оси X аналогична конструкции устройства по оси Z. Горизонтальное устройство по оси Y изображено на рис. 4. Образец 1 помещается в захваты 2 и 3. Неподвижный захват 2 соединен с корпусом устройства 4, а подвижный захват 3 соединен со штоком гидроцилиндра 5. На штоке установлен датчик силы 6. На корпусе устройства закрепляются подвесы 7. Для собираемости установки с тремя нагрузочными устройствами корпус и захваты устройства по оси Y выполнены разборными.



**Рис. 4.** Горизонтальное нагрузочное устройство по оси Y:

1 — образец; 2 и 3 — неподвижный и подвижный захваты; 4 — корпус устройства;  
5 — шток гидроцилиндра; 6 — датчик силы; 7 — подвесы

Давление, регулируемое в зависимости от заданной программы нагружения, подается по трубопроводам от маслонасосной станции. Установка рассчитана на максимальную нагрузку 50 кН по каждой оси. Регистрация показаний датчиков всех трех нагрузочных устройств во время эксперимента проводится тензометрической системой СТММ с дискретностью 0,1 с.

#### **Расчет НДС кубического образца при равноосном трехосном нагружении.**

Для изучения распределения напряжений в рабочей части кубического образца (см. рис. 1), изготовленного из оргстекла (полиметилметакрилата), были проведены расчеты, моделирующие эксперимент на трехосное равномерное растяжение. Расчеты проводились методом конечных элементов в программе ANSYS версии 11.0 в линейной постановке и с учетом физической нелинейности материала. Для определения характеристик материала, используемых в расчете, были проведены испытания плоских образцов оргстекла на растяжение. Получена диаграмма деформирования и определены следующие характеристики материала: модуль упругости  $E = 2618$  МПа; предел текучести при растяжении  $\sigma_T = 30$  МПа; предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 66,5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

С учетом симметрии рассматривалась 1/8 часть конструкции. Использовался элемент SOLID 186 — квадратичный 20-узловой элемент трехмерного НДС. В зонах со сложной геометрией строилась нерегулярная сетка с элементами в форме тетраэдра. В целях проверки сходимости решения проведена серия расчетов с различным числом элементов, результаты которых приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

#### **Анализ сходимости решения**

Номер расчета	Число КЭ в модели	Число узлов	Максимальная интенсивность напряжений, МПа	Расхождение с предыдущим расчетом, %
1	1150	3789	132,6	—
2	2416	7354	129,7	-2,18
3	8801	24762	128,7	-0,77
4	30869	86883	129,1	0,3

Как следует из табл. 1, при увеличении числа конечных элементов разность между результатами расчетов снижается, т. е. наблюдается сходимость решения. Для дальнейших расчетов выбран вариант № 3. Конечно-элементная модель из 8801 элемента и 24 762 узлов, приведена на рис. 5. На заштрихованных площадках в направлении нормали к ним задавались перемещения  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  и  $\delta_z$ , что соответствует схеме нагружения в натурном эксперименте. В расчетах с моделью линейно-упругого материала задавались значения  $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0,2$  мм, в расчетах с учетом физической нелинейности —  $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0,4$  мм. Предполагалось, что в зоне контакта проскальзывание между образцом и захватом отсутствует, поэтому прочие компоненты перемещений в площадке задавались равными нулю. На площадках A, B и C заданы симметричные граничные условия, запрещающие перемещения в направлении нормали к площадкам.

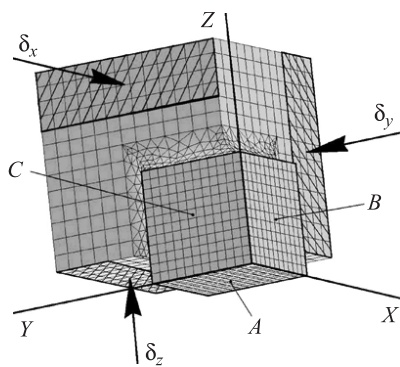


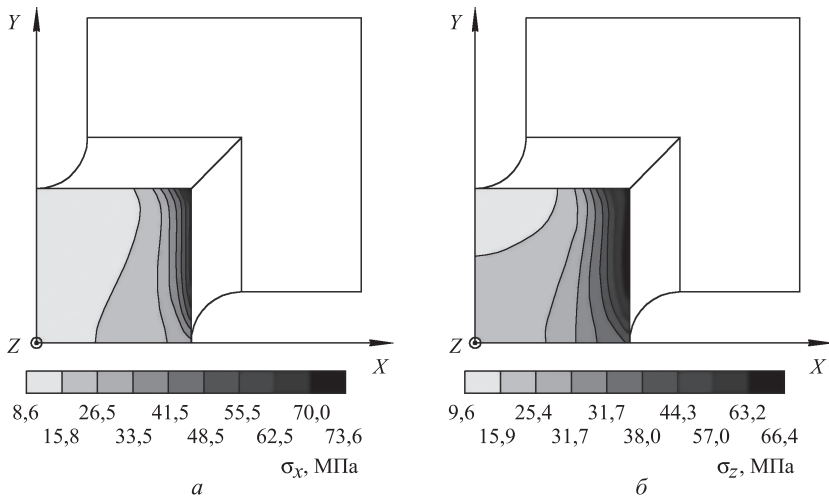
Рис. 5. Конечно-элементная модель и приложенные к ней нагрузки

Для анализа возможности создания равноосного растяжения в материале образца достаточно рассмотреть распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ .

В результате расчетов выявлено, что есть зона, где нормальные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  отличаются от соответствующих напряжений в центре образца менее чем на 5 %, расположена внутри рабочей части образца и имеет размер порядка  $8 \times 8 \times 8$  мм. Расчетное значение интенсивности напряжений в этой зоне растяжения близко к нулю и, следовательно, близки к нулю значения касательных напряжений.

На рис. 6, а приведены результаты решения линейно-упругой задачи распределения нормальных напряжений  $\sigma_z$  в сечении, лежащем в плоскости симметрии образца. В силу симметрии задачи этот рисунок показывает также распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . На рис. 6, б приведены результаты расчета с учетом физической нелинейности материала. В этом случае зона, где наблюдается напряженное состояние равноосного растяжения, увеличивается.

При анализе результатов расчета необходимо оценить распределение напряжений по сечению. В качестве критериев оценки принимались следующие параметры:  $k = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{расч}}$  — коэффициент концентрации напряжений ( $\sigma_{\max}$  — максимальное значение нормального напряжения в сечении;  $\sigma_{\text{расч}} = F/S$  — расчетное значение нормального напряжения в рабочей части образца;  $F$  — сила, действующая в направлении нормали к сечению,  $S$  — площадь сечения);  $n = \sigma_{\text{ц}} / \sigma_{\text{расч}}$  — параметр однородности напряженного состояния ( $\sigma_{\text{ц}}$  — напряжение в центре рабочей зоны образца). Значения коэффициентов в случае однородного напряженного состояния в рабочей части образца должны равняться единице.



**Рис. 6.** Распределение нормальных напряжений в сечении образца при расчете в линейной (а) и нелинейной постановке (б)

Коэффициент концентрации напряжений в упругой задаче равняется 3,61, параметр однородности напряженного состояния 0,689. При переходе к физически нелинейной задаче коэффициент концентрации напряжений уменьшается до 2,37, параметр однородности распределения напряжений при этом равен 0,706. Общий характер распределения напряжений по сечению близок для обеих задач.

Таким образом, образец описанной конструкции может быть использован для проведения испытаний на трехосное растяжение. Для получения более достоверных экспериментальных данных необходимо найти пути снижения концентрации напряжений и создания более равномерного распределения деформаций в рабочей зоне образца. С этой целью рассмотрены другие варианты конструкции образцов, в том числе и составных, изготовленных из двух материалов. Расчеты проводились в упругой постановке (табл. 2). Здесь обозначено:

- образец № 1 — исходный вариант с размерами, приведенными на рис. 1;
- образец № 2 — кубический образец с пропилами вдоль ребер, изображенный на рис. 7, а; аналогичный образец описан в работе [6];
- образец № 3 (рис. 7, б) отличается от исходного варианта (№ 1) формой канавок: для снижения концентрации напряжений дно канавки в сечении имеет полуэллиптическую форму с полуосями 3 мм и 1,5 мм;
- образец № 4 (рис. 7, в) составной: основная часть образца (1) имеет форму куба с ребром 38 мм, ширина канавок увеличена до 8 мм; канавки имеют прямоугольное сечение, дно плоское; затем канавки заполняются вспомогательным материалом (2), после чего механической обработкой размеры образца приводятся к базовому варианту (№ 1), при этом модули упругости основного и вспомогательного материалов соотносятся как 2 : 1;

• образец № 5 (рис. 7, *з*) составной: форма и внешние размеры аналогичны № 1, рабочая часть образца — куб со стороной 18 мм, выполненный из испытуемого материала (1); затем этот куб помещается в куб со стороной 38 мм из вспомогательного материала (2), после чего в нем выполняются канавки, при этом модули упругости основного материала и вспомогательного материалов соотносятся как 5 : 1.

Таблица 2

Результаты расчета образцов различной конструкции

Номер образца	Коэффициент концентрации напряжений $k$	Параметр однородности напряженного состояния $n$
1	3,61 (2,37*)	0,689 (0,706*)
2	2,0	0,715
3	2,18	0,712
4	1,37	0,792
5	2,03	0,756

\* Для расчета с учетом физической нелинейности.

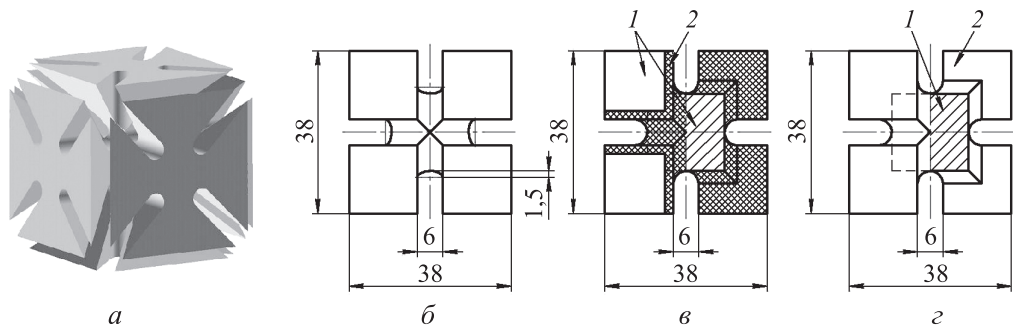


Рис. 7. Варианты конструкции образца для трехосного растяжения

Как следует из табл. 2, наилучшие характеристики имеют образцы составной конструкции. Вместе с тем изготовление подобных образцов существенно более трудоемко. Также следует отметить, что при описанном способе закрепления образца имеет место внецентренное нагружение. Поэтому одним из возможных способов дальнейшего снижения концентрации напряжений является изменение способа приложения нагрузки к образцу.

**Экспериментальные результаты.** В табл. 3 приведены результаты испытаний кубических образцов из оргстекла при равномерном трехосном нагружении. При этом геометрия образцов соответствовала рис. 1. Коэффициент концентрации напряжений  $k$  и параметр однородности  $n$  взяты из КЭ-расчета с учетом физической нелинейности.

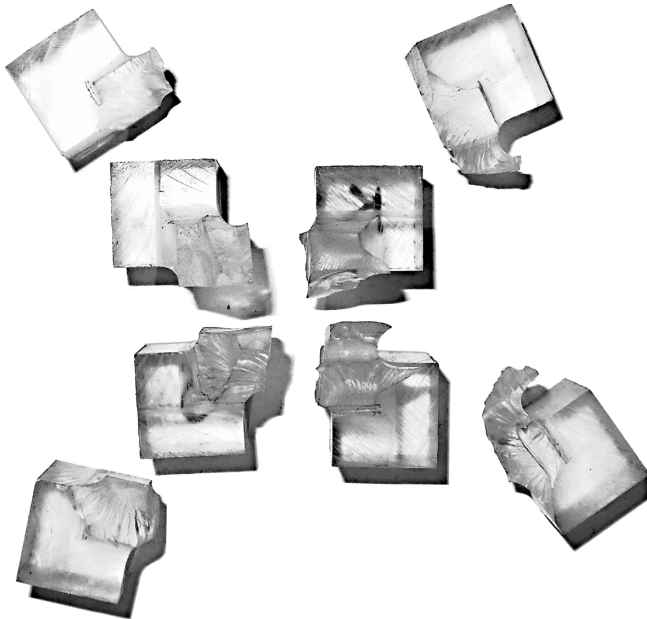


**Результаты испытания кубических образцов на равномерное трехосное растяжение**

Номер образца	Расчетное напряжение разрушения $\sigma_{расч} = F/S$ , МПа	Максимальное напряжение при разрушении $\sigma_{max} = k\sigma_{расч}$ , МПа	Напряжение в центре рабочей части при разрушении $\sigma_{ц} = n\sigma_{расч}$ , МПа
1	15,97	37,86	11,28
2	20,42	48,39	14,42
3	16,11	38,17	11,37
4	20,03	47,47	14,14
5	28,55	67,67	20,16
6	18,86	44,69	13,31
7	30,50	72,28	21,53
8	22,67	53,73	16,01

Среднее значение напряжения в середине рабочей части образца составило 14,3 МПа. С вероятностью 0,95 экспериментальные значения лежат в доверительном интервале 12,82...17,34 МПа. Таким образом, учитывая результаты проведенных расчетов, можно утверждать, что предел прочности оргстекла при равномерном трехосном растяжении с вероятностью 0,95 не ниже нижней границы доверительного интервала, 12,82 МПа.

Разрушение всех испытанных образцов происходило в рабочей части. Типичный вид разрушения образца представлен на рис. 8.



**Рис. 8.** Разрушенный образец при трехосном растяжении

**Закключение.** 1. Разработана методика испытаний образцов материала на трехосное растяжение.

2. Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить испытания образцов материала на трехосное растяжение. Проведенные пробные испытания подтвердили работоспособность предложенной методики.

3. В соответствии с разработанной методикой в настоящее время проводятся испытания на трехосное растяжение образцов пространственно армированных композитов. Результаты будут опубликованы в последующих работах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Верецагин Л.Ф.* Избранные труды. Твердое тело при высоких давлениях. М.: Наука, 1981. 286 с.
2. *Верецагин Л.Ф.* Избранные труды. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. М.: Наука, 1982. 329 с.
3. *Зиновьев П.А., Кулиш Г.Г., Цветков С.В.* Процессы деформирования и разрушения композиционных материалов при высокоинтенсивном трехосном нагружении. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 95 с.
4. *Calloch S., Marquis D.* Triaxial tension-compression tests for multiaxial cyclic plasticity // *International Journal of Plasticity*. 1999. Vol. 15. P. 521–549.
5. *Welsh J.S., Adams D.F.* Development of electromechanical triaxial test facility for composite materials // *Experimental Mechanics*. 2000. Vol. 40. No. 3. P. 312–320.
6. *ISO 16842: 2014.* Metallic materials — Sheet and strip — Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece.
7. *Boehler J.P., Demmerle S., Koss S.* A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials // *Experimental Mechanics*. March 1994. P. 1–9.
8. *Моширева К.А., Свистков А.Л., Шадрин В.В.* Определение формы образцов для экспериментов на двухосное растяжение // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т. 7. № 4. С. 353–362.
9. *A.C. СССР № 1762165A1, G01N3/00.* Образец для испытаний на равномерное трехосное растяжение // *А.Н. Еремичев, П.А. Зиновьев, О.В. Татарников, С.В. Цветков.*

**Цветков Сергей Васильевич** — заведующий сектором лаборатории композитов НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Кулиш Геннадий Георгиевич** — заведующий лабораторией Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141814, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево), старший преподаватель кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Смердов Андрей Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Барышев Антон Николаевич** — инженер лаборатории композитов НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Тащилов Сергей Васильевич** — канд. техн. наук, начальник отделения ОАО «Композит» (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4).

**Магнитский Илья Владимирович** — заместитель начальника отделения ОАО «Композит» (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4).

**Пономарёв Кирилл Александрович** — заместитель начальника отдела ОАО «Композит» (Российская Федерация, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4).

**Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Цветков С.В., Кулиш Г.Г., Смердов А.А., Барышев А.Н., Тащилов С.В., Магнитский И.В., Пономарёв К.А. Методика и экспериментальные исследования материалов при трехосном растяжении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 76–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-76-88

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF MATERIALS IN TRIAXIAL TENSION

S.V. Tsvetkov<sup>1</sup>

G.G. Kulish<sup>1,2</sup>

A.A. Smerdov<sup>2</sup>

asmerdov@mail.ru

A.N. Baryshev<sup>1</sup>

S.V. Tashchilov<sup>3</sup>

I.V. Magnitskiy<sup>3</sup>

K.A. Ponomarev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University, Orevo, Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> JSC Kompozit, Korolev, Moscow Region, Russian Federation

---

### Abstract

This work shows practical necessity of material testing in complex stress state. The study pays special attention to the difficulties in triaxial tension material testing, one of them being the absence of standard methods, standard samples and machines for such kind of testing. We list common characteristics of multiaxial testing machines and formulate the requirements for the shape and dimensions of a triaxial tension samples. Moreover, we propose a cubic sample for such kind of testing and use it when conducting finite element modeling. We briefly describe hydraulic triaxial testing installation and illustrate the research with the experimental results for polymethylmethacrylate (PMMA) cubic sample

### Keywords

*Triaxial tension, complex stress state, numerical simulation, test sample, testing machine, polymethylmethacrylate*

## REFERENCES

- [1] Vereshchagin L.F. *Izbrannye trudy. Tverdoe telo pri vysokikh davleniyakh* [Selected works. Solid under high pressure]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 286 p.
- [2] Vereshchagin L.F. *Izbrannye trudy. Sinteticheskie almazy i gidroekstruziya* [Selected works. Synthetic diamonds and hydrostatic extrusion]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 329 p.
- [3] Zinov'ev P.A., Kulish G.G., Tsvetkov S.V. *Protsessy deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov pri vysokointensivnom trekhosnom nagruzhении* [The processes of deformation and fracture of composite materials under high intensity triaxial loading]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2005. 95 p.
- [4] Calloch S., Marquis D. Triaxial tension-compression tests for multiaxial cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*, 1999, vol. 15, pp. 521–549.
- [5] Welsh J.S., Adams D.F. Development of electromechanical triaxial test facility for composite materials. *Experimental Mechanics*, 2000, vol. 40, no. 3, pp. 312–320.
- [6] ISO 16842: 2014. *Metallic materials — Sheet and strip — Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece.*
- [7] Boehler J.P., Demmerle S., Koss S. A new direct biaxial testing machine for anisotropic materials. *Experimental Mechanics*, March 1994, pp. 1–9.
- [8] Moshireva K.A., Svistkov A.L., Shadrin V.V. Designing of specimen shape for biaxial stretching experiments. *Vychislitel'naya Mekhanika Sploshnykh Sred* [Computational Continuum Mechanics], 2014, vol. 7, no. 4, pp. 353–362 (in Russ.).  
DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.34
- [9] Eremichev A.N., Zinov'ev P.A., Tatarnikov O.V., Tsvetkov S.V. *Obrazets dlya ispytaniy na ravnomernoe trekhosnoe rastyazhenie* [The specimen for testing at uniform triaxial tension]. A. s. SU no. 1762165A1, G01N3/00.
- Tsvetkov S.V.** — Head of the Sector of Laboratory of Composites, Research Institute of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).
- Kulish G.G.** — Head of Laboratory of Dmitrov Branch, Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141814 Russian Federation), Assist. Professor of Spacecraft and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).
- Smerdov A.A.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Spacecraft and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).
- Baryshev A.N.** — engineer of Laboratory of Composites, Research Institute of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).
- Tashchilov S.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC Kompozit (ul. Pionerskaya 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).
- Magnitskiy I.V.** — Deputy Head of the Department, JSC Kompozit (ul. Pionerskaya 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Ponomarev K.A.** — Deputy Head of the Department, JSC Kompozit (Pionerskaya ul. 4, Korolev, Moscow Region, 141070 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Tsvetkov S.V., Kulish G.G., Smerdov A.A., Baryshev A.N., Tashchilov S.V., Magnitskiy I.V., Ponomarev K.A. Experimental Research of Materials in Triaxial Tension. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 5, pp. 76–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-76-88