

Комплексные испытания по определению механических свойств высоконаполненного полимерного материала

09, сентябрь 2014

Еремичев А. Н.

УДК: 620

Россия, МГТУ им. Баумана

lestech91@gmail.com

В современном машиностроении последние 30-40 лет широко используют высоконаполненные полимерные материалы (ВНПМ). У таких материалов, для достижения заданных характеристик, металлических компонентов относительно много по сравнению с полимерным связующим и оно не обеспечивает достаточного сцепления металлических частиц, а следовательно и необходимой механической прочности. В этом случае для повышения прочности изделий из ВНПМ используют гидростатическое (всестороннее) прессование при больших (100 МПа и более) давлениях. При этом получают материалы, механическое поведение которых отличается от всех ранее изученных материалов.

Это требует разработки специальных методов исследования механических характеристик таких материалов, а также разработки моделей механического поведения ВНПМ, позволяющих проводить расчеты изделий из таких материалов.

Комплекс работ по решению этих двух вопросов был выполнен на факультете СМ МГТУ им. Н.Э.Баумана.

До начала работ в МГТУ механические свойства ВНПМ определялись с помощью образцов, полученных «глухим» (т.е. прессованием в форму) прессованием. Однако свойства материалов полученных «глухим» и гидростатическим прессованием различны. Поэтому была разработана методика изготовления образцов из изделия механической обработкой. При этом основное внимание было уделено выбору таких режимов механической обработки, что бы механические характеристики образцов и изделия были идентичны.

При составлении программы испытания образцов исходили из условия проведения минимального количества типов испытаний, позволяющих достаточно полно выявить основные особенности механического поведения ВНПМ и определить механические характеристики конкретного состава.

Программа включала следующие виды испытаний:

- испытания на сжатие;
- испытания на растяжение;
- испытания на «чистый» сдвиг;
- испытания при комбинированном нагружении.

Первые три типа испытаний предусматривали как деформирование с постоянной скоростью, так и испытания на ползучесть при разных уровнях напряжения. При сжатии исследовалось влияние скорости деформирования.

ВНПМ обладают свойствами пластичности и ползучести; траектории нагрузки и разгрузки у них не совпадают. Для изучения этого явления проводились испытания:

- на циклическое сжатие до разных уровней максимального напряжения;
- на несимметричный циклический сдвиг.

Испытания при комбинированном нагружении проводились для выбора критерия прочности материала, а также для проверки разработанной теоретической модели.

Механические свойства материала ранее определялись на образцах в виде прессованных кубиков, цилиндров и лопаток. Однако такие образцы не точно определяют механические характеристики полноразмерных изделий. Это связано с тем, что распределение напряжений при глухом прессовании иное, чем при прессовании в гидростате.

В данной работе использовались образцы, полученные механической обработкой из диска- свидетеля, у которого обеспечена идентичность натурному изделию как по составу, так и по техпроцессу изготовления.

ВНПМ – новые материалы и государственных стандартов на их образцы не существует.

Для выполнения вышеизложенной программы были разработаны три типа образцов: образец на сжатие, образец на растяжение и образец на сдвиг.

При выборе формы образцов использовались рекомендации для хрупких металлов, бетона, пластмасс, которые по некоторым из свойств похожи на ВНПМ.

При этом исходили из необходимости выполнения следующих требований:

- создание равномерного распределения деформаций в пределах зоны измерения;
- обеспечение разрушения образца в пределах зоны измерения;
- образцы должны быть изготовлены таким способом, чтобы не допустить изменения свойств исходного материала.

Образец на сжатие представляет собой цилиндр с отношением высоты к диаметру равным 2,5. Образец на растяжение выполнен по традиционной форме гантели с уменьшенной рабочей зоной. Конкретные размеры образцов выбирались из условия обеспечения равномерности распределения деформации в зоне измерения. При выборе формы образцов использовались рекомендации [1],[2],[3]. Также определялось распределение деформации в образце методом конечного элемента, а затем проводилась экспериментальная проверка [4].

Образец на сдвиг показан на рис.1

Использование трех типов образцов было вызвано стремлением упростить и удешевить процесс изготовления и программу испытаний. Однако все исследования можно провести на образцах на сдвиг. Это было сделано для ограниченного числа испытаний.

Для испытания образцов использовались серийные испытательные машины и специально созданная установка для комбинированного нагружения образцов(КНО).

Наиболее точным способом измерения деформаций оказались непосредственно наклеенные на образцы тензодатчики с базой 20 мм и пределом измерения деформации до 2%. Механические тензометры использовались для замера деформации более 2%.

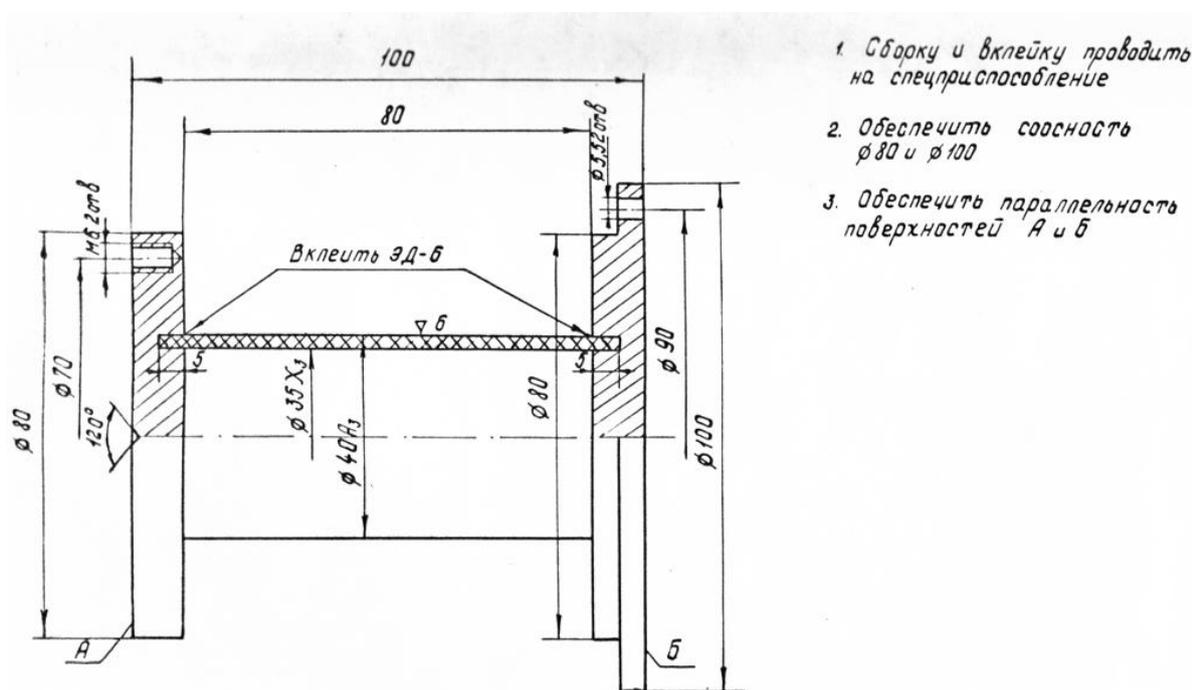


Рис. 1. Образец на сдвиг

Испытания на сжатие.

На рис.2 приведены результаты испытания на сжатие десяти зачетных образцов при скорости деформирования $18,5 \times 10^{-5}$ 1/сек при температуре 200С.

При сжатии с данной скоростью деформирования материал до напряжения примерно 10 МПа ведет себя почти линейно. При достижении максимального напряжения визуально нарушения целостности образцов не наблюдалось. Если в этот момент разгрузить образец, то он оставался целым. При дальнейшем деформировании нагрузка падала и затем происходило разрушение образца. Падающая часть кривой деформирования не имеет практической ценности. На этом участке материал уже исчерпал свою несущую способность и этот участок, в основном, определяется жесткостью захватов испытательной машины.

Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) в процессе сжатия увеличивается. Это объясняется микронарушениями сплошности образца.

Максимальное напряжение при сжатии равно 43 МПа. Доверительный интервал с вероятностью 0,95 равен 1,47 МПа.

Разброс результатов, полученных при испытании точеных образцов значительно меньше, чем при испытании прессованных образцов.

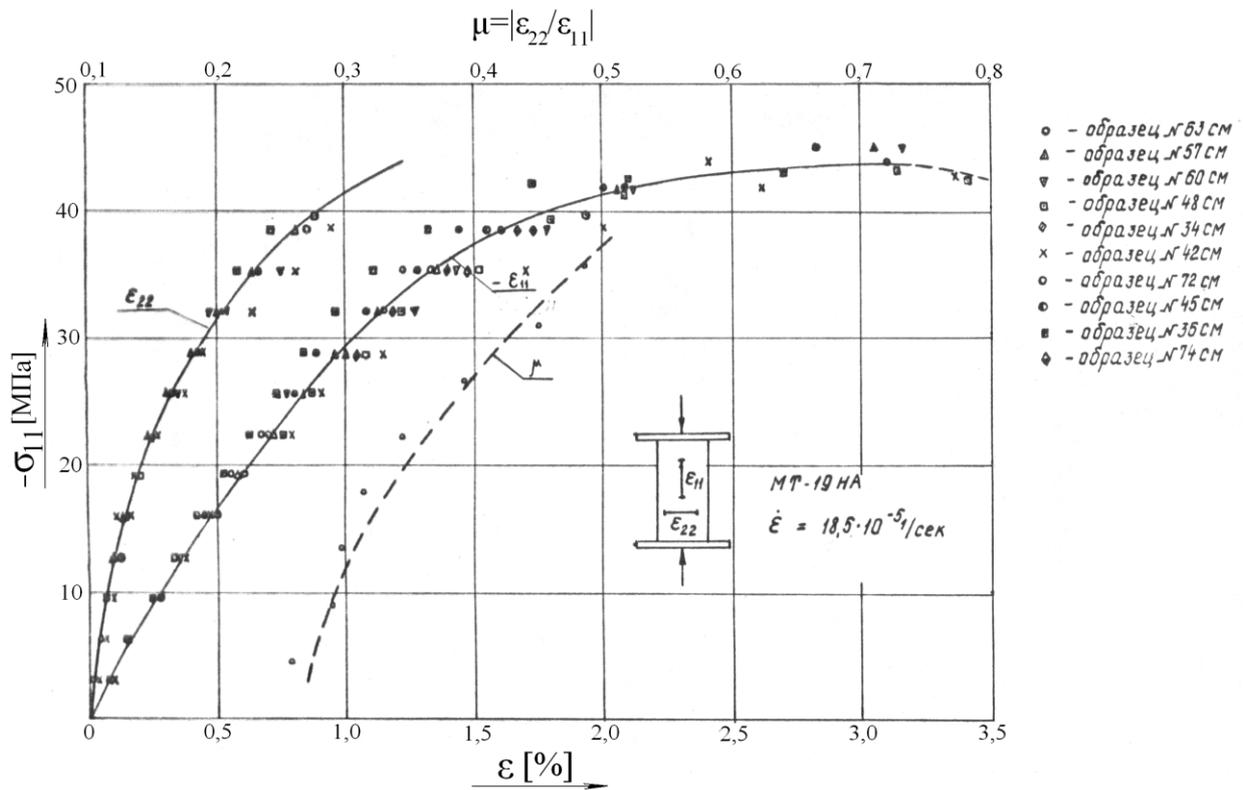


Рис.2 Кривые деформирования при сжатии

На рис.3 показано, как влияет скорость деформирования при сжатии. На каждой из семи скоростей деформирования испытывалось по четыре образца. На рис.4 приведены кривые ползучести ВНПМ.

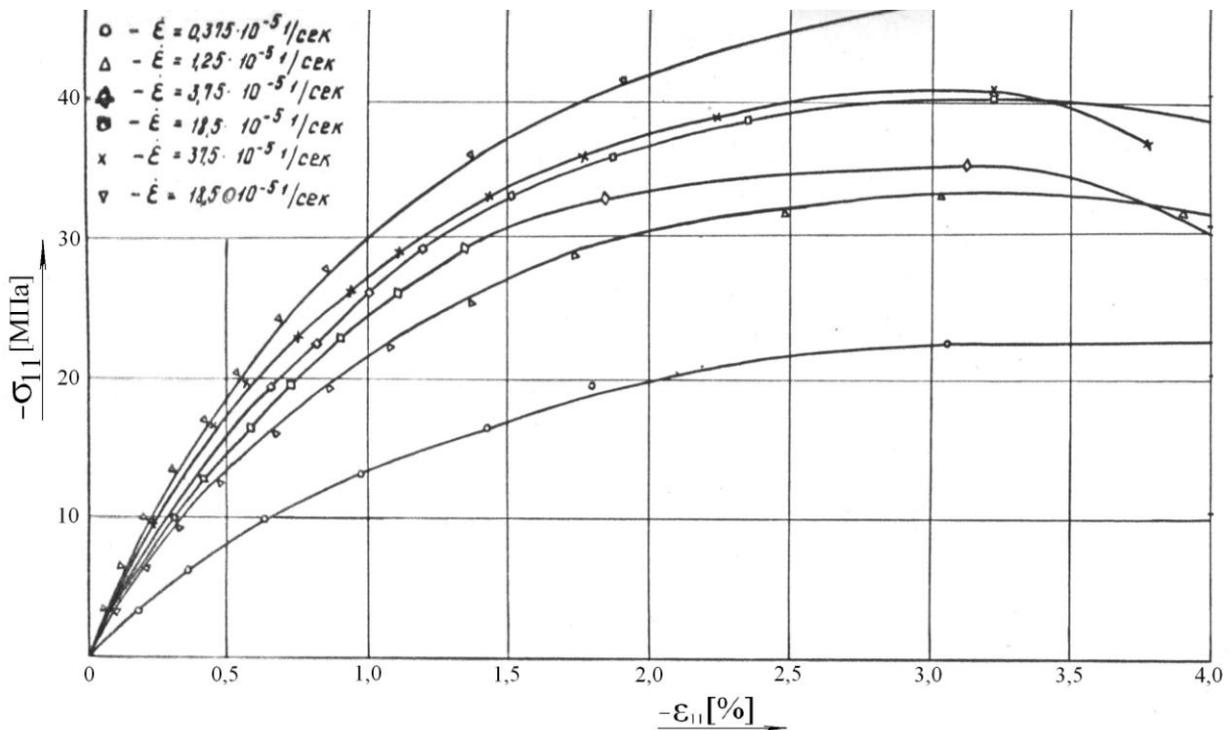


Рис.3 Зависимость от скорости деформирования при сжатии

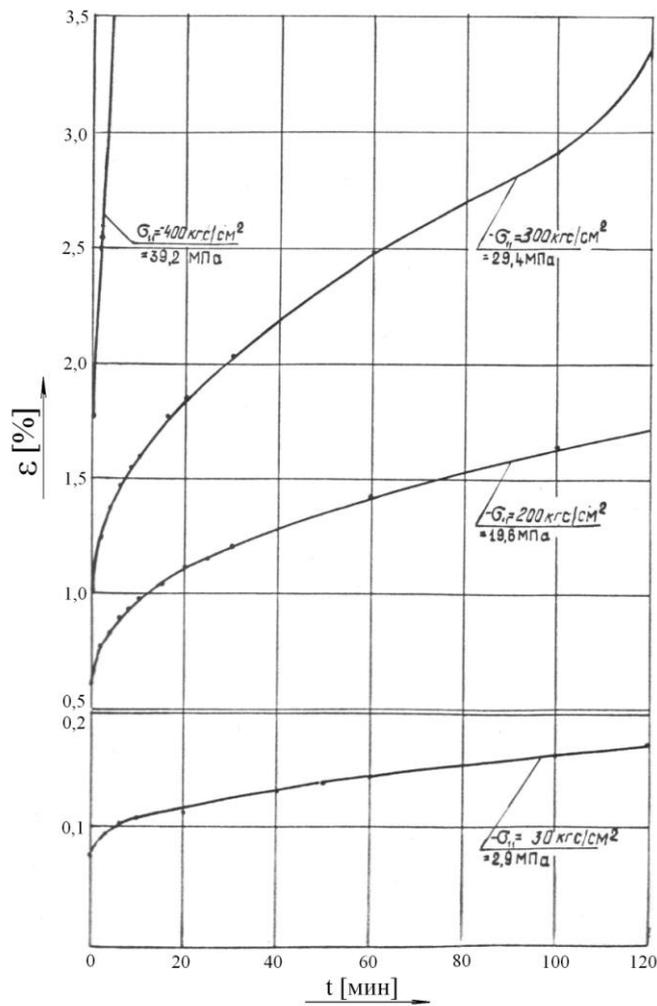


Рис.4 Ползучесть при сжатии

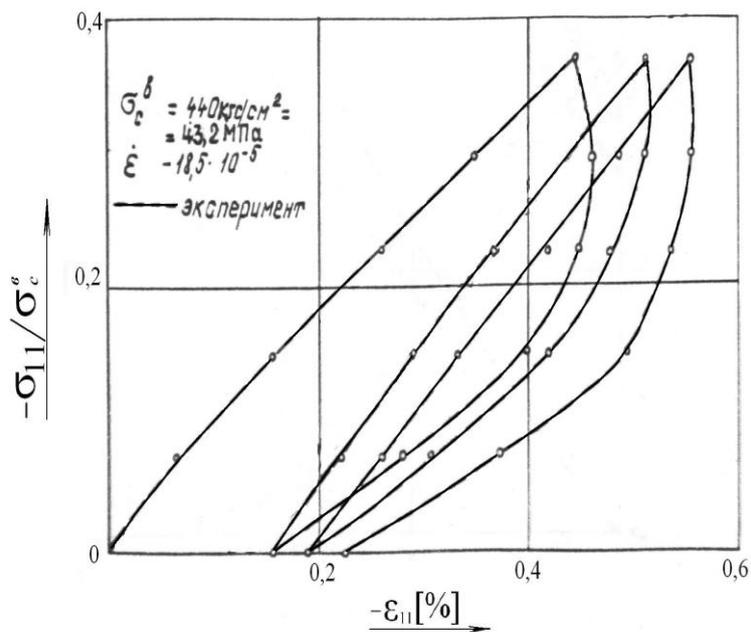


Рис.5 Цикл при сжатии

На рис.5 показано поведение материала при несимметричном циклическом сжатии, на рис.6 - как меняется коэффициент поперечной деформации при таком нагружении.

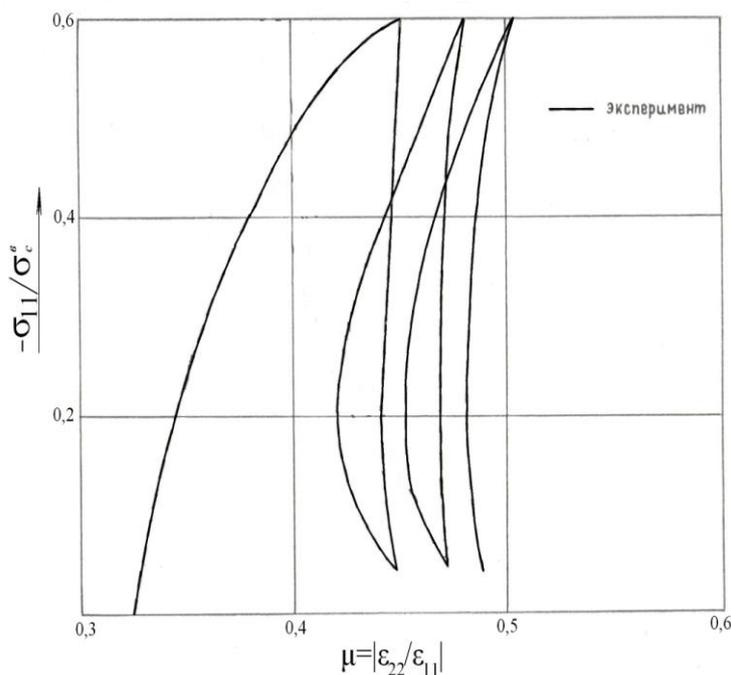


Рис.6 Изменение коэффициента Пуассона

Испытания на растяжение.

Графически результаты испытания десяти зачетных образцов на растяжение приведены на рис. 7. Скорость деформирования 8×10^{-5} 1/сек, температура 20°C . Максимальное напряжение при растяжении 9,9 МПа. Доверительный интервал с вероятностью 9,95 равен 1,5 МПа.

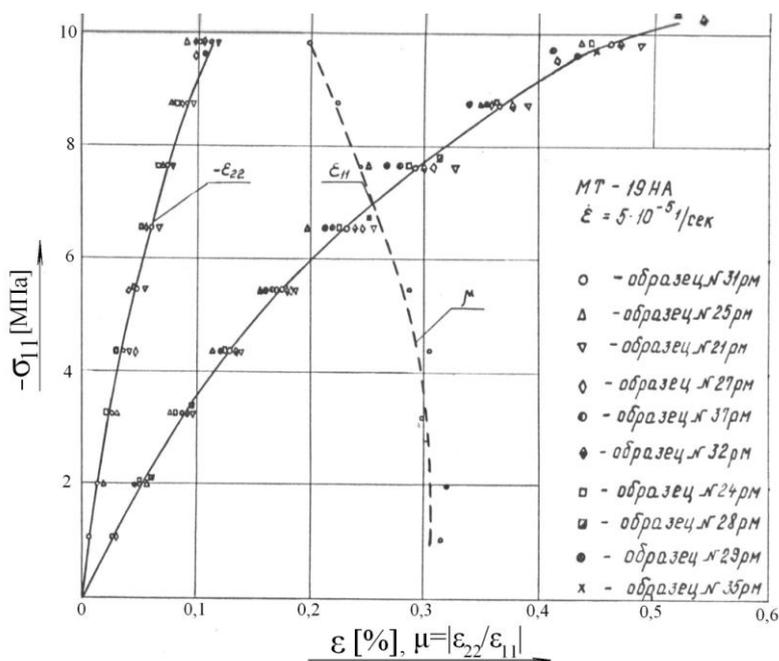


Рис. 7 Кривые деформирования при испытании на растяжение

Результаты испытания на ползучесть при растяжении показаны на рис. 8.

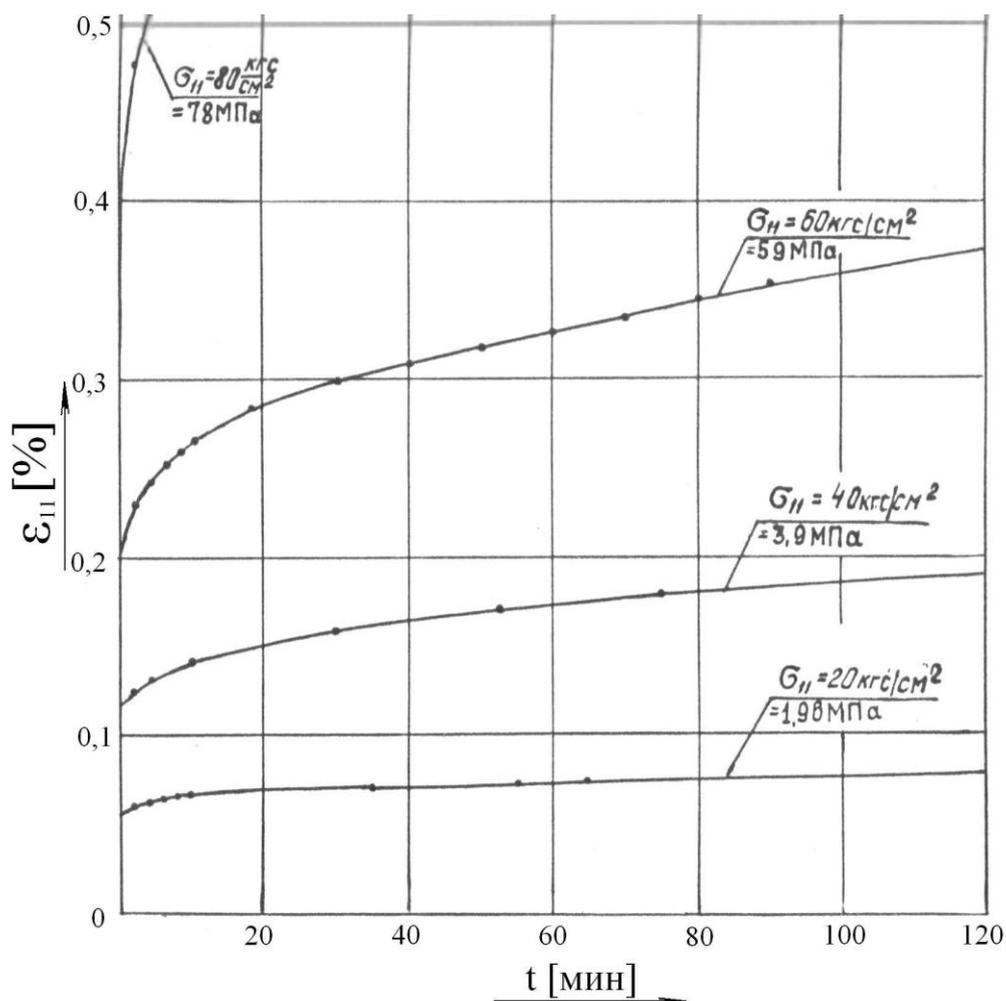


Рис.8 Ползучесть при растяжении

Исследованный ВППМ при растяжении ведет себя нелинейно как при деформировании с постоянной скоростью, так и при ползучести.

Коэффициент поперечной деформации при растяжении уменьшается, что связано с появлением микронарушений сплошности. Другой характер изменения его, чем при сжатии, связан с различной ориентацией этих явлений.

Установка для комбинированного нагружения образцов.

Для определения критерия прочности, а также для проверки разработанной теоретической модели механического поведения материала, нужны двух- и трехосные испытания. Для этого была разработана и создана установка для комбинированного нагружения образцов (КНО), показанная на рис.9.

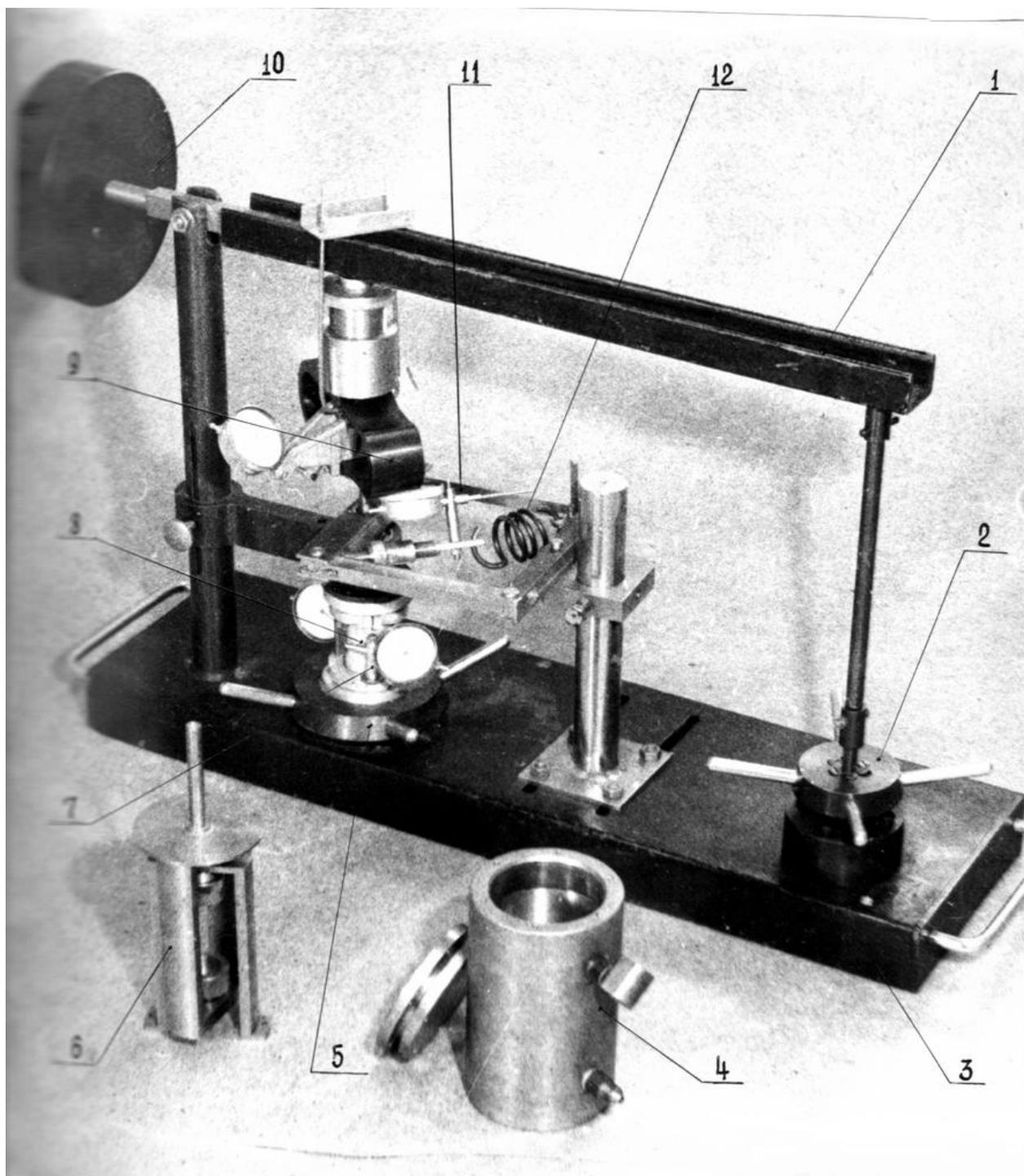
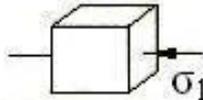
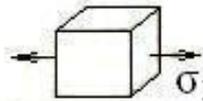
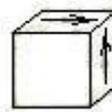
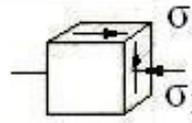
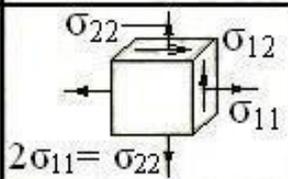
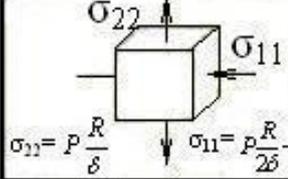
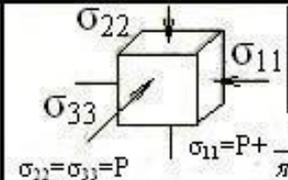


Рис.9 Установка для комбинированного нагружения образцов (КНО). 1-рычаг; 2-винтовая пара для нагружения; 3-основание; 4-камера для создания внешнего давления; 5-гайка для фиксации образца; 6-реверса для испытания на растяжение; 7-механический тензометр для испытаний на сдвиг; 8-образец для испытаний; 9-динамометр; 10-противовес; 11-рамка для нагружения на сдвиг; 12-динамометр для измерения усилия сдвига.

На данной установке можно создавать следующие виды напряженного состояния.

Тип напряженного состояния	Вид испытания	Напряженное состояние	Тип образца
Одноосное	сжатие		рис. 1
	растяжение		рис. 2
Двухосное	сдвиг		рис. 3
	сдвиг + осевое сжатие		рис. 3
	сдвиг + внутреннее давление		рис. 3
	сжатие + внутреннее давление		рис. 3
Трехосное	сжатие + внешнее давление		рис. 1

Испытания на сдвиг.

Образцы, показанные на рис.1, испытывались на установке КНО со скоростью деформирования 8×10^{-5} 1/сек. Графически результаты десяти зачетных образцов показаны на рис.10

Разрушение образцов при сдвиге происходило по винтовой линии с углом подъема $45-50^{\circ}$. Образец, разрушенный при чистом сдвиге, - крайний слева на рис.11.

Предел прочности при сдвиге равен 8,4МПа при доверительном интервале 1,4 МПа с вероятностью 0,95.

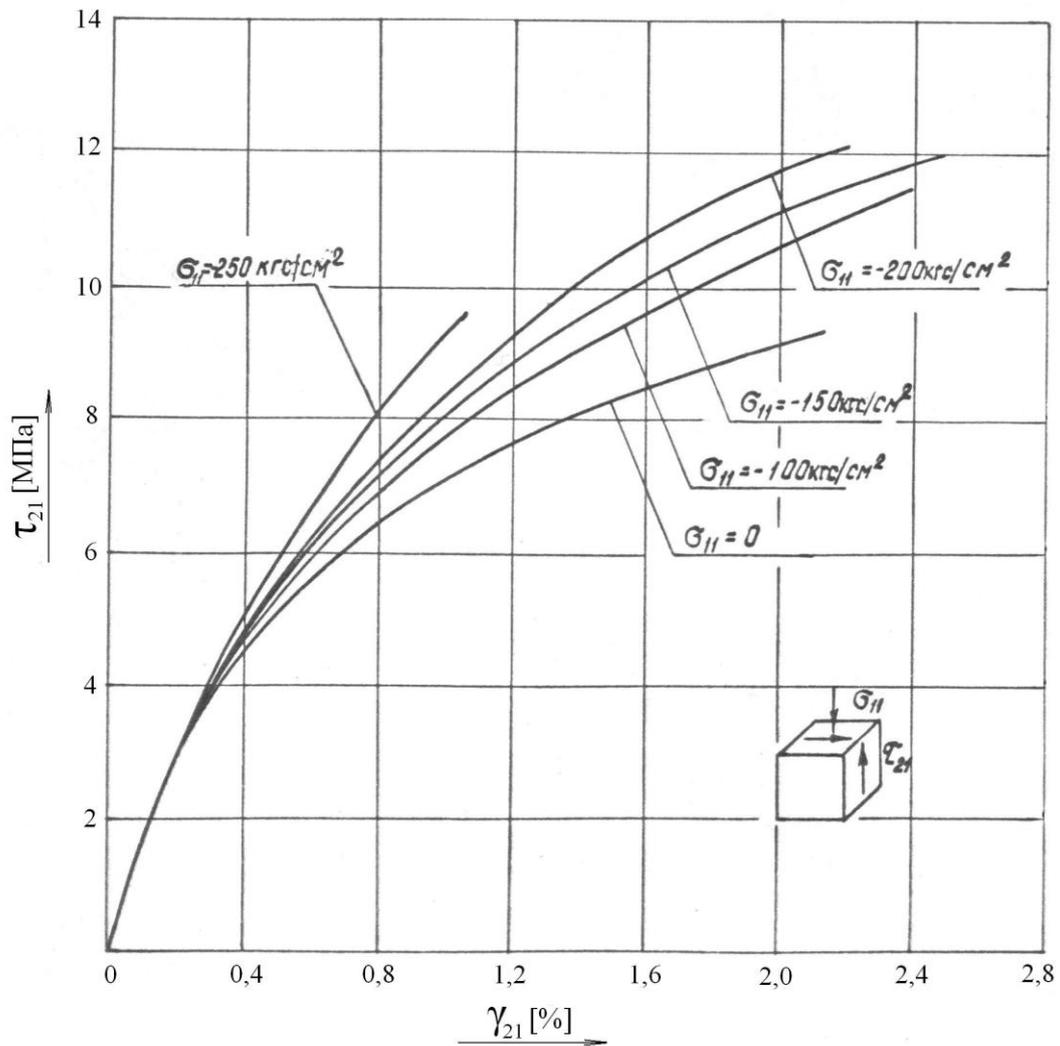


Рис.10 Испытания на сдвиг и на сдвиг с осевым сжатием

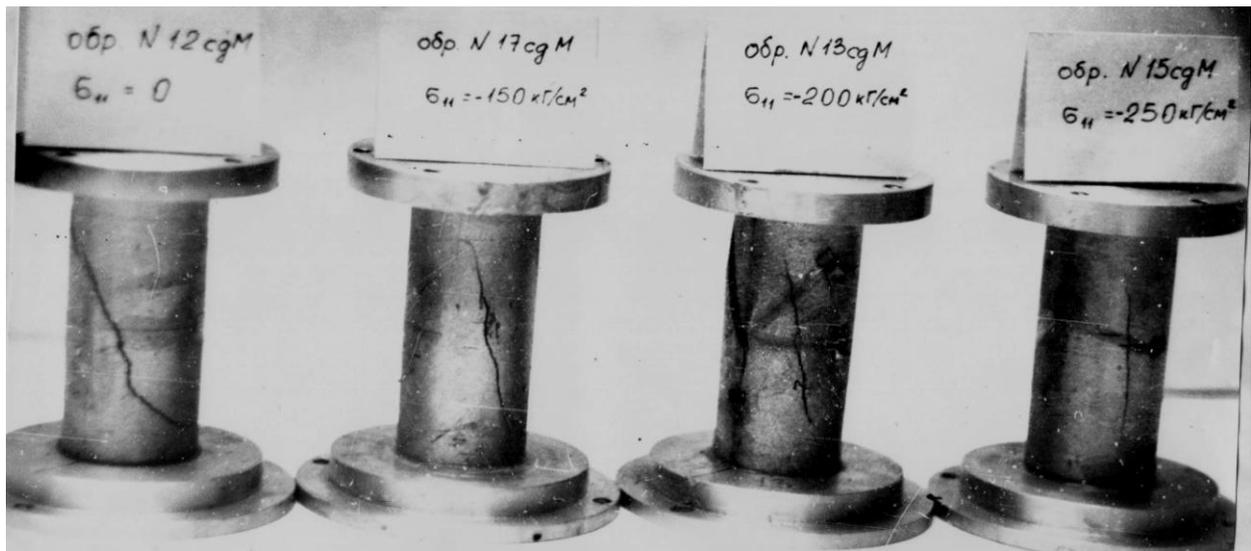


Рис.11 Разрушение образцов при сдвиге и при сдвиге с осевым сжатием

Результаты испытаний на ползучесть при сдвиге показаны на рис.12. Образец при постоянном напряжении сдвига 5,9 МПа разрушился через 30 минут после приложения нагрузки; образец с напряжением 6,9 МПа разрушился через 32 секунды

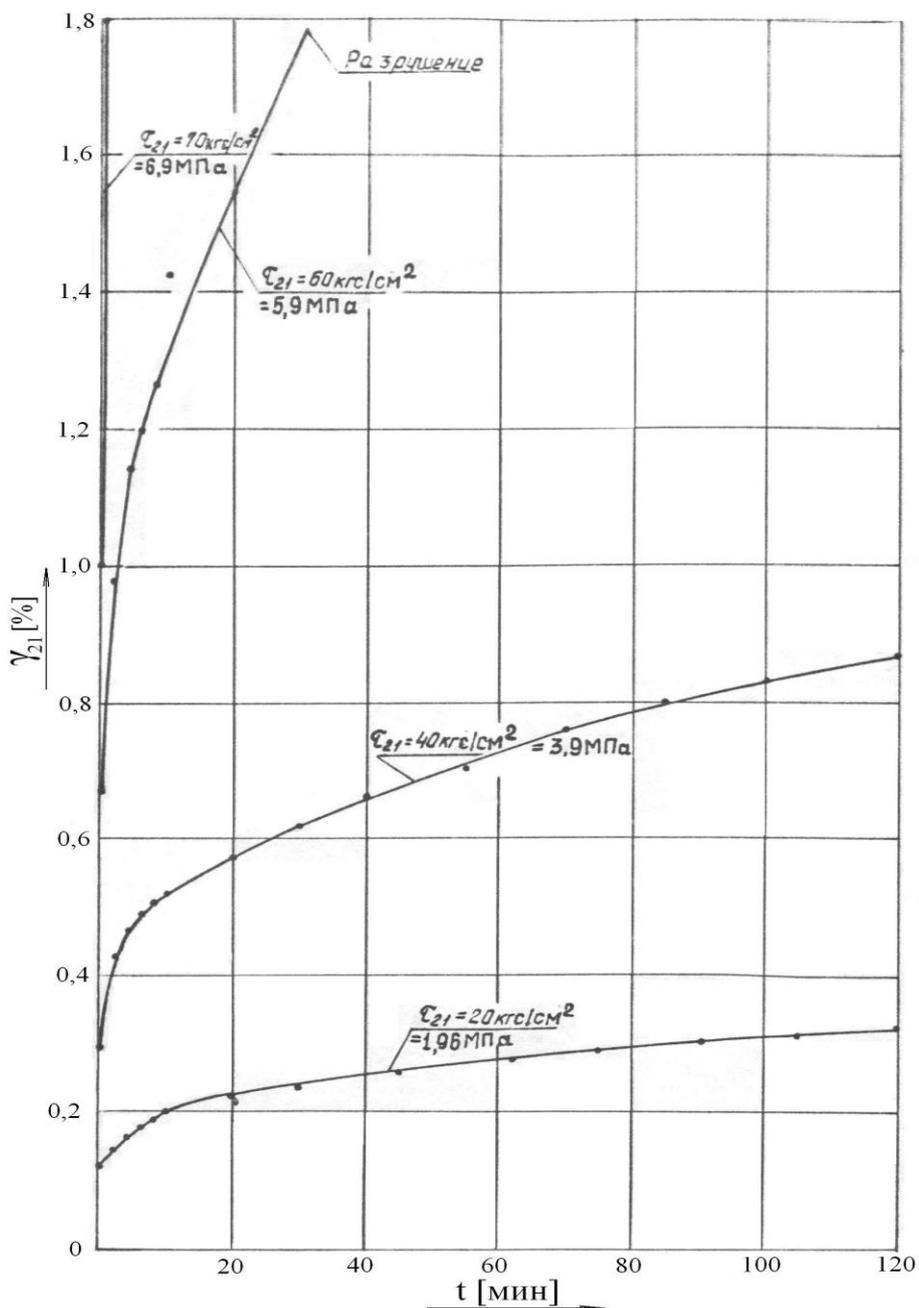


Рис.12 Ползучесть при сдвиге

Пластические, временные свойства ВППМ проявляются также при циклических испытаниях на сдвиг. Пример одного такого нагружения до напряжения 6,4 МПа приведен на рис.13. Пути нагрузки и разгрузки не совпадают. Образуется петля гистерезиса. Разрушение данного образца произошло на втором цикле.

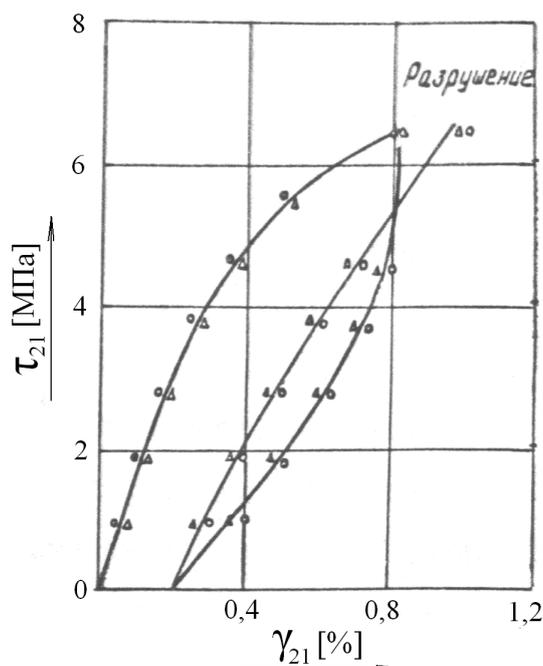


Рис.13 Цикл при сдвиге

Двухосное напряженное состояние создавалось на установке КНО при использовании образцов, показанных на рис.1. Первоначально образец сжимался до соответствующих уровней сжимающего напряжения и, поддерживая это напряжение постоянным, затем закручивался. Сжимающее усилие передавалось на образец через стальной шарик, что позволяло свести к минимуму влияние момента трения.

Результаты таких испытаний показаны на рис.10. Увеличение жесткости при осевом сжатии, вероятно, объясняется увеличением сил трения между частицами материала. Характер разрушения образцов при наличии осевого сжатия меняется. При увеличении сжимающей нагрузки угол подъема винтовой линии, по которой разрушается образец, также увеличивается. Если при чистом сдвиге этот угол равен $45-50^\circ$, то по сжимающей нагрузке $25,5 \text{ МПа}$ – почти 90° (рис.11).

Сравнение результатов испытания образцов и натуральных изделий.

При испытании натуральных изделий, ввиду их габаритов, трудно создать такие же уровни напряжений и такие же скорости деформирования, как и при испытании образцов. Практически невозможно осуществить напряженное состояние чистого сдвига. Однако отдельные виды напряженных состояний можно создать и в натурном изделии.

На рис 14 приведены результаты испытания на сжатие со скоростью деформирования $0,33 \times 10^{-5} \text{ 1/сек}$ натурального изделия диаметром $0,5 \text{ м}$ и длиной $2,5 \text{ м}$. Здесь же нанесены результаты испытания десяти образцов, полученных механической обработкой, при скорости деформирования $0,375 \times 10^{-5} \text{ 1/сек}$. Штриховые линии показывают доверительный интервал с вероятностью $0,95$ для образцов.

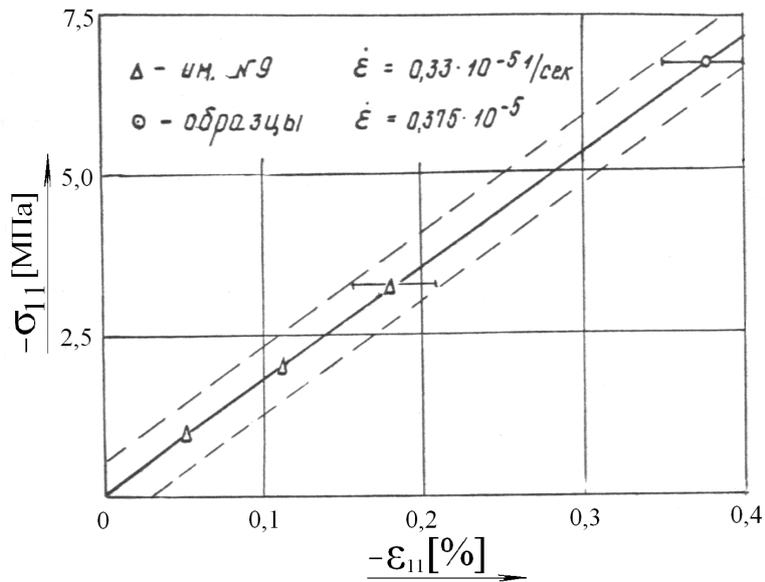


Рис.14 Сравнение результатов испытания образцов и натуральных изделий

Видно, что механические свойства натуральных изделий и образцов, полученных точением, практически совпадают. При выбранных режимах механической обработки разрыхления ВНПМ не наблюдается. Форма и размеры образцов выбраны удачно, т.к. не проявляется масштабный фактор.

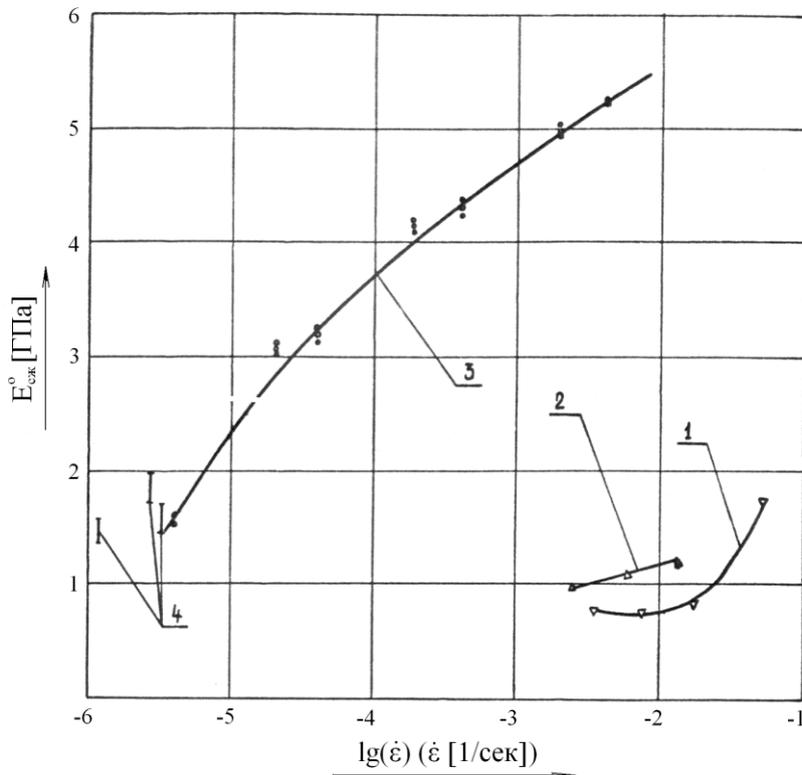


Рис.15 Начальный модуль в зависимости от десятичного логарифма скорости деформирования. 1 - прессованные кубики с длиной ребра 20 мм; 2 - прессованные цилиндры высотой 30 мм и диаметром 20 мм; цилиндры изготовленные точением высотой 50 мм и диаметром 20 мм; 4 - натурные изделия.

Данные, полученные при испытании образцов, изготовленных механической обработкой, лучше описывают свойства натуральных изделий, чем полученные на образцах, изготовленных глухим прессованием. Модуль на сжатие у последних оказался в 4-10 раз меньше чем у полноразмерного изделия. На рис.15 показана зависимость начального модуля при сжатии до напряжения 7,1 МПа от десятичного логарифма скорости деформирования. Кривая 1 соответствует данным, полученным при испытании прессованных кубиков с длиной ребра 20 мм; кривая 2 – прессованным цилиндрам диаметром 20 мм и высотой 30 мм; кривая 3- цилиндрическим образцам диаметром 20 мм и высотой 50 мм, изготовленных точением. Точки 4 получены при испытании натуральных изделий.

Анализ механических свойств ВНПМ.

У многих материалов диаграммы деформирования перестроенные в осях интенсивностей совпадают. Аналогичные кривые для ВНПМ показаны на рис.16.

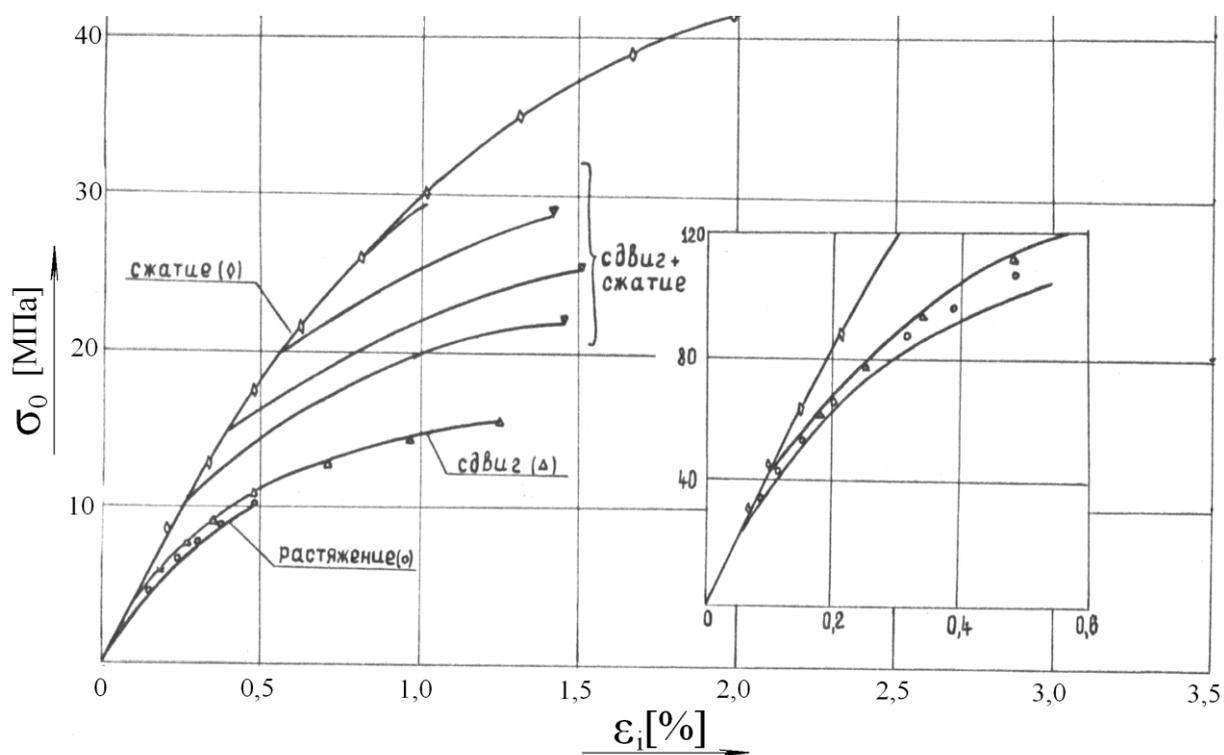


Рис.16 Кривые деформирования в осях интенсивностей

Зависимость между шаровыми тензорами напряжения и деформации (средним напряжением и средней деформацией) для этого же материала показана на рис.17.

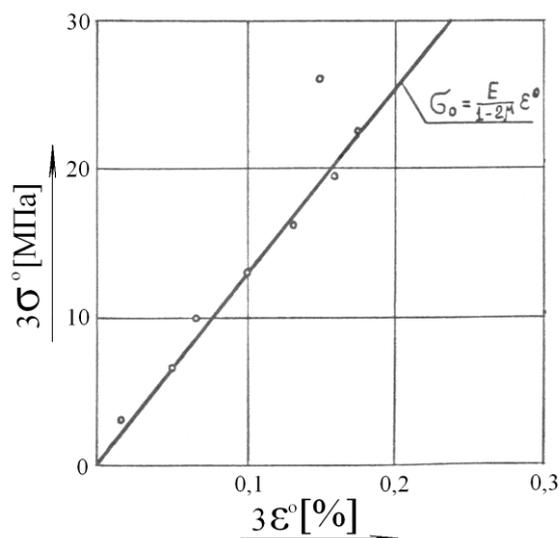


Рис.17 Зависимость между шаровыми тензорами напряжения и деформации

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы об особенностях механического поведения ВНПМ:

1. Предложенные образцы, изготовленные механической обработкой с ограничениями по скорости резания, верно определяют механические свойства реальных изделий из ВНПМ. В этом отношении они лучше ранее использовавшихся прессованных образцов. Отличие механических характеристик прессованных образцов и натуральных изделий объясняется принципиально различным характером распределения напряжений в процессе их изготовления.

2. Материал в составе изделия, прошедшего гидростатическое прессование, изотропен.

3. При сжатии, растяжении, сдвиге ВНПМ ведет себя нелинейно.

4. ВНПМ значительно жестче, чем материалы на основе каучукоподобных связующих. Деформации в нем вплоть до разрушения не превышают: при сжатии – 3,0-3,5%, при растяжении – 0,5%, при сдвиге – 2,5%.

5. Зависимость между шаровыми тензорами напряжения и деформации близка к линейной.

6. Зависимости в осях интенсивностей не совпадают и не могут служить универсальной характеристикой. Прочность при сжатии примерно в четыре раза больше прочности при растяжении. Однако начальные модули при сжатии и растяжении практически совпадают.

7. При несимметричном циклическом нагружении, если амплитуда напряжения не превышает определенной величины, происходит упрочнение материала.

8.ВНПМ не имеет четко выраженного предела упругого деформирования. Даже при небольших, по сравнению с разрушающим, напряжениях материал проявляет вязкопластические свойства: кривые нагрузки и разгрузки не совпадают.

9.Структурные изменения у ВНПМ проходят во времени. Он чувствителен к скорости нагружения. Свойство ползучести у материала проявляются при сжатии, растяжении, сдвиге. Ползучесть ВНПМ нелинейная. Скорость её зависит от величины напряженя.

10.С помощью простейших теорий пластичности или вязкоупругости описать такие свойства ВНПМ невозможно.

Список литературы

1. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств материалов.- М.: Машиностроение, 1972.-298с.
2. Конструкционные полимеры. Кн.1//Огибалов П.М., Малинин Н.И., Нетребко В.П., Кишкин Б.П.- М.: Изд.МГУ,1972.-322с.
3. Методы испытания на растяжение, ГОСТ 1497-61. 3с.
4. Еремичев А.Н. О выборе относительной высоты цилиндрических образцов для испытаний на сжатие.- Отраслевой бюллетень ВИНТИ №10, М.: 1981.-с.1-7.