

В.Н. Сергиенко, канд. техн. наук,  
В.Н. Трипольский, гл. технолог,  
В.А. Амелин, гл. технолог  
(ИГТМ НАН Украины)

## **О БЕСКОНТАКТНОМ ИЗМЕРЕНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Розроблено методику безконтактного вимірювання деформацій шляхом фотозйомки з високою розрізняльною здатністю. Описано алгоритм комп'ютерної обробки первинних даних.

## **ABOUT OF NON-INVASIVE PROBING OF DEFORMATIONS AT TESTS OF SAMPLES OF ROCKS.**

The procedure of non-invasive probing of deformations by photography's with high resolution is developed. The algorithm of computer processing of the primary data is described.

Для качественной прогнозной оценки поведения геоматериалов в условиях больших глубин необходимо определение ряда параметров, которые можно получить при обработке полных диаграмм деформирования в продольном и поперечном направлении. В большинстве известных методик измерение малых деформаций породных образцов осуществляется с использованием контактных датчиков [1].

Принцип работы большинства датчиков деформации заключается в преобразовании величины линейного перемещения в пропорциональный аналоговый сигнал. Для измерения абсолютных деформаций до 10 мм традиционно используются тензометрические датчики [2]. Типичная приведенная погрешность преобразования линейного перемещения в аналоговый электрический сигнал составляет порядка 0,5 %. При преобразовании в цифровой код дополнительная погрешность составляет около 0,2%. Одними из лучших являются тензометрические преобразователи типа ДТН-А, производимые в России по лицензии японской фирмы Куова и характеризующиеся коэффициентом нелинейности преобразования порядка 0,1 %, а также дополнительной погрешностью, связанной с гистерезисом, которая составляет менее 0,1%. Принципиальным недостатком тензометрических датчиков является относительно большое значение упругой реакции, которое может в определенной степени исказить результаты измерений при испытании слабых пород. Так для упомянутых датчиков типа ДТН-А5 (предел измерения 5 мм) сила реакции в конечной точке диапазона составляет 1,5 Н.

Измерительные преобразователи с реактивными элементами обладают меньшими значениями величины контактного давления. Для перемещений в пределах нескольких миллиметров определенное распространение получили емкостные датчики [3]. Однако более перспективными являются индуктивные датчики, позволяющие реализовать более широкий динамический диапазон преобразования линейного перемещения в электрический аналог [4]. В последнее десятилетие широкое распространение получили, принадлежащие к указан-

ной категории, так называемые LVDT-датчики, представляющие собой линейные дифференциальные трансформаторы с переменным коэффициентом передачи. Лидирующие позиции в их производстве занимает американская компания Macro Sensors. Их основными преимуществами являются уменьшение величины гистерезиса, уменьшение величины контактного давления датчика на измеряемый объект, упрощение преобразования результатов измерений в цифровой код для связи с компьютерными устройствами. При этом датчики обладают высокими метрологическими характеристиками. К примеру, датчики модели DLH-A, имеющие диапазон измерения деформаций от 0 до 5 мм, характеризуются приведенной погрешностью 0,1 %. Для испытаний прочных пород с высоким модулем упругости можно рекомендовать прецизионный дифференциальный трансформаторный датчик с цифровым выходом типа SG722-2. При пределе измерения 2 мм его разрешающая способность составляет 1 мк.

Независимо от типа контактного датчика, они имеют общий недостаток – необходимость тщательной установки перед началом измерений с учетом индивидуальных размеров образца. С учетом того, что диапазон измерений деформаций образца соизмерим с вариациями его линейных размеров, механическая система позиционирования датчиков должна быть высокоточной и достаточно жесткой. Процедура установки в рабочее положение контактных датчиков и приведение измерительной системы к исходному нулевому отсчету во всех направлениях измерения деформаций длится намного дольше, чем сам процесс разрушающих испытаний образца.

В процессе разрушения образца на стадии запредельного деформирования величина поперечной деформации может превысить допустимую для данного типа датчика и привести к необратимому ухудшению его метрологических характеристик.

Контактирующие с плитами пресса плоскости породных образцов никогда не бывают идеально параллельными. В процессе испытаний высокопрочных образцов одна из плит пресса, снабженная шаровой опорой, может несколько проворачиваться, вызывая изменение выходного сигнала каждого из расположенных рядом с образцом датчиков вертикального перемещения. В идеальном случае при одинаковых передаточных характеристиках первичных преобразователей перемещения и их симметричном расположении относительно оси поворота плиты влияние указанного процесса можно было бы свести к нулю, но реально его можно лишь уменьшить.

С учетом указанных недостатков контактных датчиков значительный интерес представляют бесконтактные методы измерения малых деформаций. Начиная с 80-ых годов прошлого века во всех промышленно развитых странах мира, в том числе и в СССР, для прецизионных измерений начинает широко использоваться лазерная интерферометрия [5]. Указанное направление продолжает интенсивно развиваться в России [6-8]. Так в научно-исследовательском и конструкторском институте оптико-электронных приборов создана оптико-электронная система для измерения линейных смещений ФЭС-2. Система позволяет дистанционно, с расстояния в пределах от 1 до 10 м регистрировать по

двум координатам деформации в пределах от 0 до 5 мм с разрешающей способностью 5 мк.

В числе мировых лидеров по разработке и производству лазерных систем для высокоточного определения размеров и позиционирования деталей - компания Renishaw (Великобритания). Разработанные ее специалистами устройства позволяют достичь точности, намного превышающей ту, которая необходима при испытаниях образцов. К примеру, с 2007 г. освоено промышленное производство высокоточной лазерной системы XL-80 для наладки прецизионных станков. Максимальная разрешающая способность определения линейной координаты составляет 0,5 нм.

Лазерные интерферометры без сомнения являются весьма подходящими устройствами для высокоточного определения деформаций породных образцов, в том числе при высокой скорости деформационных процессов. Однако они относятся к категории сложного и дорогостоящего оборудования и их применение целесообразно только в специализированных организациях, где испытания материалов является одним из основных видов деятельности.

Авторами предложен и практически апробирован более простой способ реализации идеи бесконтактной регистрации деформаций. Он включает периодическое фотографирование испытуемого образца цифровым фотоаппаратом с высокой разрешающей способностью и последующую компьютерную обработку фотоснимков. Достоинствами указанного подхода являются:

- значительное расширение диапазона измерений по сравнению с контактными датчиками;
- возможность учета погрешностей, связанных с поворотом образца в процессе выполнения испытаний;
- получение дополнительной информации о состоянии образца в процессе его деформирования под нагрузкой;
- возможность повторной перепроверки значений определяемых деформационных параметров с использованием сохраненных фотоматериалов.

Идея метода очень простая. Для образца размерами  $a \times b$  определяют с учетом возможностей оптического зумпфа рабочее поле для фотографирования размерами  $a^* \times b^*$ , которое в идеальном случае должно превышать размеры образца на величину его максимальных деформаций. В реальной ситуации определяются большим из размеров, ориентируя соответствующим образом кадр. Кроме этого, для определения абсолютных значений деформаций в кадре должна находиться опорная линейная шкала. По указанной шкале в процессе компьютерной обработки фотоизображения определяется масштаб.

Оценим разрешающую способность метода. Наиболее употребительными при выполнении разрушающих испытаний являются образцы горных пород в виде кубика с ребром 40 мм. С учетом необходимости присутствия в кадре торцевых участков образца, а также табло силоизмерителя, необходимый вертикальный размер кадра можно принять в 1,5 раза больше, т. е. равным 60 мм. Для кадра с соотношением сторон 3:4 его горизонтальный размер будет составлять 80 мм. Если максимальная разрешающая способность фотоаппарата будет

равна  $m \times n$  ( $m > n$ ), то линейное разрешение по горизонтали составит  $80/m$  (мм), а по вертикали  $60/n$  соответственно.

Рассмотрим конкретный пример. В процессе разрушающих испытаний по одной из проб алевролита, представленной образцами в виде кубиков с ребром 40 мм, были получены значения модуля Юнга  $E = 6,5$  ГПа и предела прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж.} = 53$  МПа. Как правило, величина сжимающего напряжения, при котором деформирование можно считать упругим, не превышает 70% от предела прочности на одноосное сжатие. В данном случае она составляет около 37 МПа. Расчет показывает, что величина максимальной относительной продольной деформации в пределах упругого участка составляет около 0,6 %. Соответственно величина максимальной абсолютной продольной упругой деформации составит 0,24 мм. Разрешающая способность снимка по вертикали должна быть хотя бы порядок выше, т. е. она должна составлять порядка 0,02 мм. Отсюда минимальное значение параметра  $n = 60/0,02 = 3000$ .

Из приведенных рассуждений видно, что важнейшей критериальной величиной, по которой необходимо выбирать цифровой фотоаппарат, является его разрешение. Немаловажным обстоятельством является и большой диапазон для оптического зумфа, позволяющий помещать в поле кадра только необходимые элементы без потери разрешающей способности. Минимальное расстояние фокусировки желательно иметь не более 0,5 м.

Характеристики некоторых цифровых фотоаппаратов, приемлемых для использования при разрушающих испытаниях образцов, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики цифровых фотоаппаратов с высоким разрешением

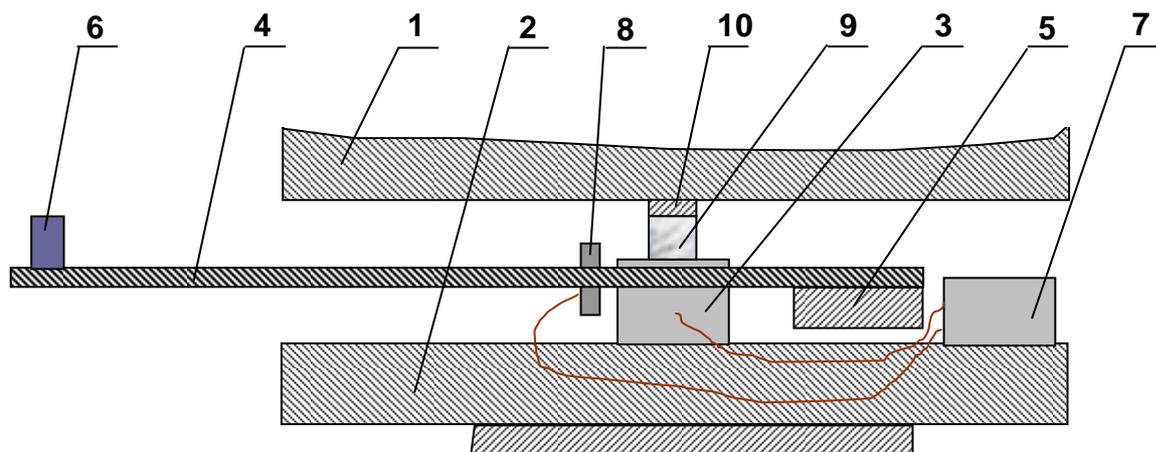
Фирма	Модель	Разрешение	Оптический зум	Минимальное расстояние фокусировки, см
Canon	EOS 500D	4272 x 2848	нет данных	50
	EOS 7D	5184 x 3456	нет данных	50
Olympus	TOUGH-9010	4288 x 3216	10	28
Sony	DSC-W210	4000 x 3000	4	нет данных
Pentax	Optio P80	4000 x 3000	4	10
Casio	EX-Z2000	4320 x 3240	5	40
Fujifilm	FinePix F100fd	4000 x 3000	5	45
Panasonic	DMC-FT2	4320 x 3240	5	30
Samsung	PL150	4000 x 3000	5	100

Авторами использовался цифровой фотоаппарат Kodak EasyShare C182 с разрешением 4000 x 3000 (12,4 Мпс) и оптическим зумфом, равным 3.

Для проведения испытаний образцов с бесконтактной регистрацией деформации был собран стенд, конструкция которого представлена на рис. 1.

Устройство работает следующим образом. При плавном нагружении образца 9 тензометрический силоизмеритель 4 формирует сигнал постоянного тока, пропорциональный сжимающему усилию, которое одинаково для него и для установленного на нем образца. В электронном блоке 7 сигнал усиливается. Предварительно производится установка нуля и калибровка с тем, чтобы вели-

чина напряжения, отображаемая на вольтметре 8, численно соответствовала значению приложенной нагрузки, выраженной в кН.



1 – верхняя плита прессы, 2 – нижняя плита прессы, 3 - тензометрический силоизмеритель, 4 – несущий кронштейн, 5 – противовес, 6 – фотоаппарат, 7 - электронный блок, 8 – вольтметр, 9 – испытуемый образец, 10 – буфер

Рис. 1 – Общая схема стенда для получения полных диаграмм деформирования породных образцов с бесконтактной регистрацией деформаций

Внешний вид съемных элементов стенда представлен на рис. 2.

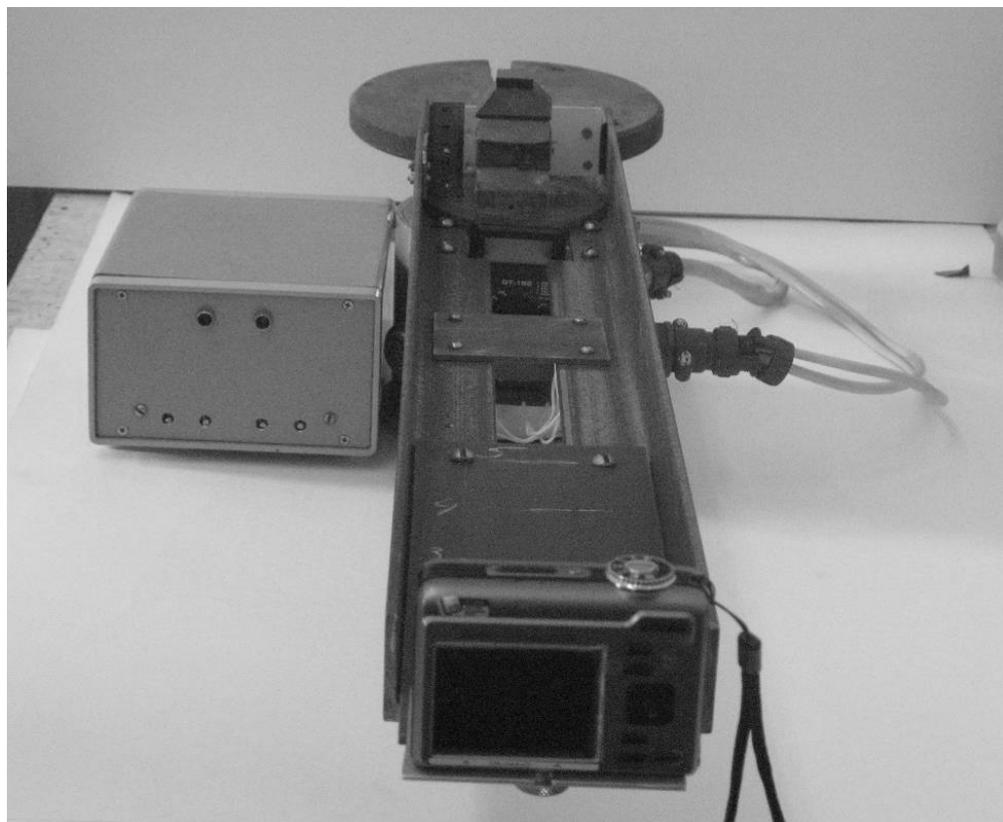


Рис. 2 – Несущий кронштейн с установленными на нем элементами и электронный блок

Фотоаппарат б жестко закреплен на кронштейне и во время испытаний сохраняет неизменное положение относительно образца.. Фотографирование осуществляется с интервалом около 5 с. В кадр попадает образец и вольтметр с показаниями текущего значения сжимающего усилия, а также жестко связанная с силоизмерителем металлическая линейка с миллиметровыми делениями для установки масштаба при электронной обработке изображения и бирка с номером образца.

Вид кадра представлен на рис. 3. По делениям на линейке определяют необходимый для электронной обработки изображения масштабный коэффициент. Определение продольной (вертикальной) деформации образца осуществляется при большом увеличении снимка по изменению положения границ образца и жестких прокладок. Поперечные деформации определяют по изменению базы между концами закрепленных на образце кнопок. Показания на шкале вольтметра – усилие, выраженное в кН.

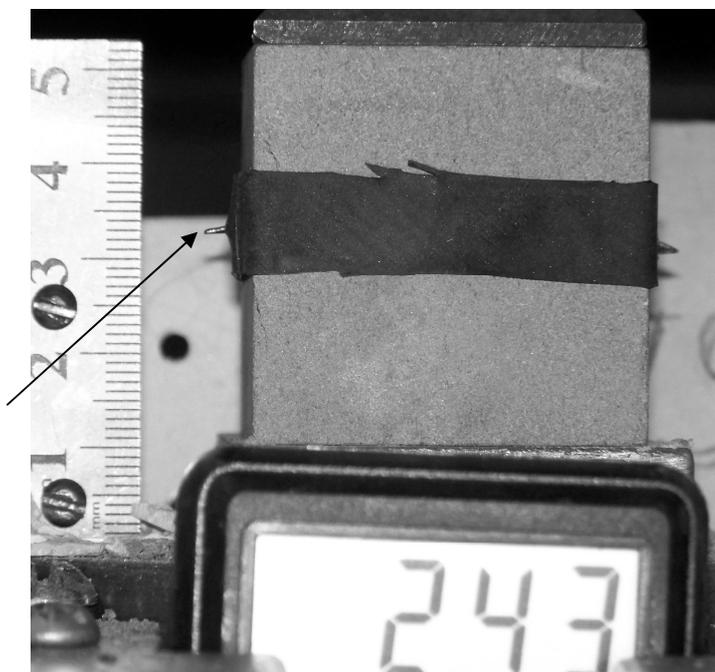


Рис. 3 – Характерный вид кадра

Компьютерную обработку изображения целесообразно выполнять с использованием стандартного офисного программного продукта Microsoft Office Publisher, который позволяет создавать планшеты больших размеров и имеет встроенные средства для определения текущих координат точки с разрешением до 5 знаков. Коэффициент масштабирования исходного изображения выбирают таким, чтобы 1 мм деления на шкале масштабной линейки соответствовал 10 см по оси линейки планшета. С учетом потери четкости изображения при большом увеличении погрешность определения координат точек, а соответственно и расстояний составляет порядка 0,02 – 0,03 мм.

Внешний вид конца булавки, положение которого отмечено стрелкой на рис. 3, при большом увеличении в контрастном изображении с расположенной рядом размерной сеткой представлен на рис. 4.

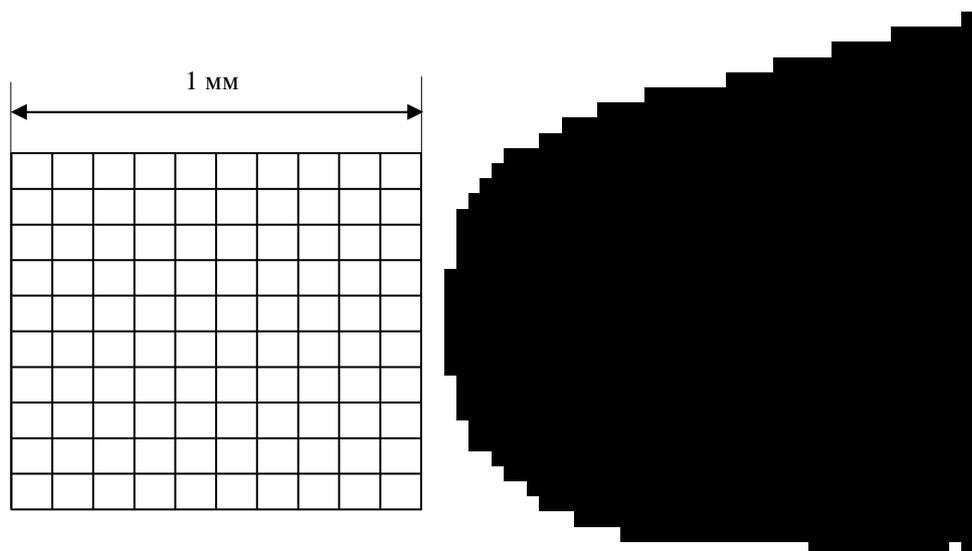


Рис. 4 – Вид конца закрепленной на образце булавки при электронном увеличении снимка

При испытании пластичных пород процесс деформирования происходит достаточно плавно и может быть отслежен во всех подробностях даже при указанной невысокой частоте фотографирования. Для получения приемлемой диаграммы деформирования образца достаточно 15 -20 снимков.

Рекомендуемый размер электронного планшета 0,7 x 1,0 м. Рекомендуемый масштаб для просмотра листа. – 200 %. Алгоритм электронной обработки снимков выполняется в такой последовательности:

- фиксируют значение нагрузки по показаниям присутствующего в кадре вольтметра;
- выполняют электронное увеличение снимка, так, чтобы база 1 мм по шкале линейки соответствовала 10 см на планшете;
- по разности координат базовых точек определяют текущую вертикальную базу (высоту образца) и текущую горизонтальную базу (расстояние между концами булавок);
- определяют абсолютное изменение вертикальной и горизонтальной базы для каждого из снимков по сравнению с первоначальными размерами;
- определяют, с учетом размеров образца, его текущую относительную деформацию в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- определяют, исходя из зафиксированной нагрузки и размеров образца, текущее напряжение в поперечном сечении;
- заносят полученные значения напряжений и соответствующих им относительных деформаций в продольном и поперечном направлениях в таблицу Microsoft Excel и с использованием мастера диаграмм строят полные диаграммы деформирования в продольном и поперечном направлениях. Пример продольной диаграммы деформирования для образца песчаника представлен на рис. 5.

Преимущества указанной методики наиболее полно проявляются при испытаниях слабых горных пород, характеризующихся большими деформациями до момента разрушения. Она также эффективна при выполнении разрушающих

испытаний применяемых в шахтном строительстве твердеющих смесей с различными сроками после начала их приготовления.

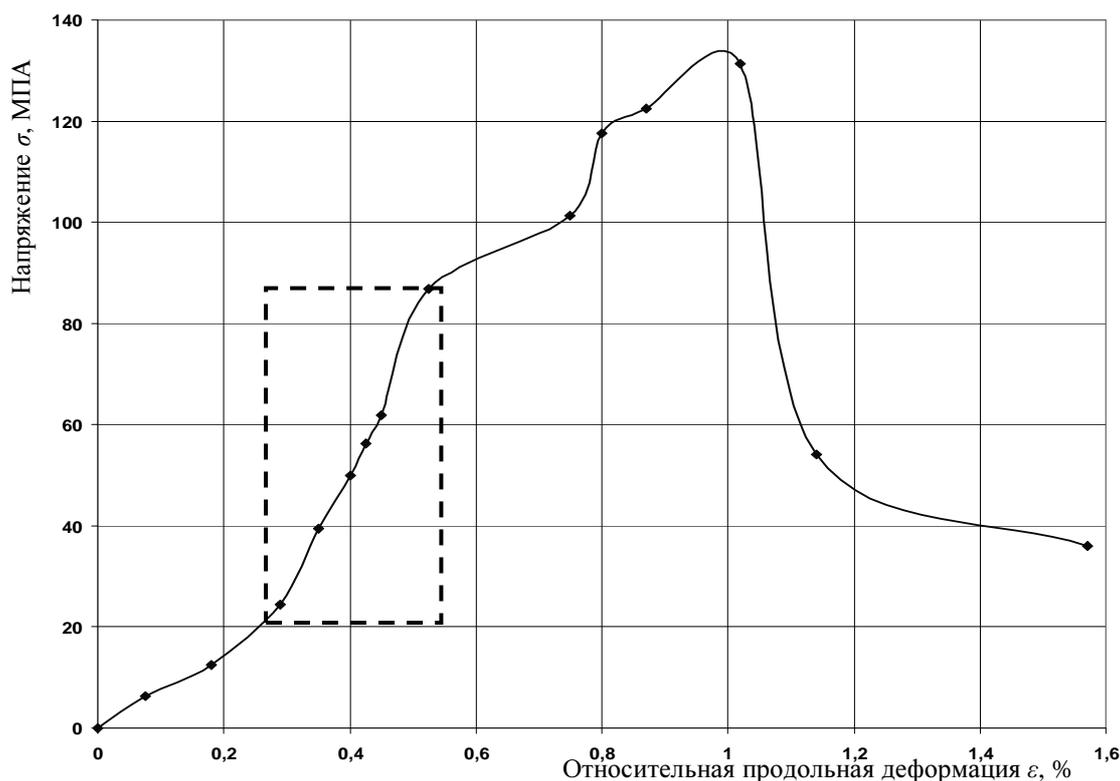


Рис. 5 – Пример полной диаграммы деформирования образца песчаника с выделенным линейным участком упругого деформирования

Обработка фотоматериалов позволяет вдобавок к возможности определения деформационных характеристик получать дополнительную информацию, например, фиксировать начало трещинообразования в образце, определять характер деформирования образца после достижения предела прочности. Хранение полученных первичных данных в электронном архиве позволяет вернуться к ним много времени спустя для проверки новых представлений о процессах деформирования пород под нагрузкой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриндли, К. Измерительные преобразователи : справ. пособие : пер. с англ. / К. Бриндли. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
2. Клокова, Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки./ Н.П. Клокова. - М.: Машиностроение, 1990.- 224 с.
3. Ефимов, П.В. Разработка емкостных датчиков линейных и угловых микроперемещений для приборов точной механики : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / П.В. Ефимов. – М., 2006. – 202 с.
4. Сергеев, С.А. Индуктивные датчики линейных перемещений / С.А. Сергеев // Датчики и системы. - 2001. - N 8. - С.53.
5. Коронкевич, В.П. Современная лазерная интерферометрия / В.П. Коронкевич, В.А. Ханов, - Новосибирск: Наука, 1985. – 181 с.
6. Мищенко, И.Д. Оптико-электронные приборы ближней дальнометрии / И.Д. Мищенко, М.П. Мусьяков. - М.: Радио и связь, 1991. - 166 с.
7. Иванов, В.А. Применение лазеров в приборах точной механики / В.А.Иванов, В.Е.Привалов, - С.-Петербург: Политехника, 1993. – 286 с.
8. Застрогин, Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования / Ю.Ф. Застрогин, О.Ю. Застрогин, А.З. Кулебякин. – М.: Машиностроение, 1995.- 315 с.