

УДК 531.7:620.173/.115.84

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-60-70

Применение панорамной спекл-интерферометрии при испытаниях на одноосное сжатие призматических пористых образцов^{*}

Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Н.М. Осипенко, А.Л. Попов,
Д.А. Челюбеев

ИПМех РАН, 119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1

Application of Panoramic Speckle Interferometry for Testing Prismatic Porous Samples for Uniaxial Compression

R.V. Goldshtein, V.M. Kozintsev, N.M. Osipenko, A.L. Popov,
D.A. Chelubeev

Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, 119526, Moscow, Russian Federation,
Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1

@ e-mail: goldst@ipmnet.ru, kozincev@mail.ru, osipnm@mail.ru, popov@ipmnet.ru, da-ch@yandex.ru

i Для регистрации полей нормальных перемещений боковых поверхностей призматических образцов в форме прямоугольных параллелепипедов при их квазистатическом сжатии в прессе применен метод панорамной спекл-интерферометрии. Решена проблема снижения вибрационных помех путем закрепления основы оптической схемы интерферометра на нижней плите прессы. Проведены экспериментальные исследования по регистрации кинетики перемещений боковых поверхностей образцов из гипса при испытаниях на продольное сжатие. Приведен пример построения полей перемещений на боковых гранях параллелепипеда и алгоритм дилатометрического расчета для пары точек, произвольно выбранных на этих гранях, по данным, полученным с интерферограммы, охватывающей благодаря специальной организации оптической схемы все четыре боковые грани образца. Приведены примеры, показывающие, что при постепенном увеличении сжатия сплошных образцов и образца со сквозным отверстием области их будущего разрушения могут быть идентифицированы по местам концентрации интерференционных полос, а области с микротрещинами — по разрывам непрерывности интерференционных полос.

Ключевые слова: панорамная спекл-интерферометрия, образец, параллелепипед, гипс, одноосное сжатие, боковые грани, нормальные перемещения.

i The panoramic speckle interferometry method is used for registering normal displacement fields on the lateral surfaces of prismatic samples shaped as rectangular parallelepipeds under quasistatic compression in a press. The problem of vibrational disturbance is solved by fixing the base of the interferometer optical scheme on the lower frame of the press. A series of experiments are performed to register displacement kinetics on the lateral surfaces of gypsum samples when tested for longitudinal compression. The authors give an example of displacement field construction on the lateral sides of the parallelepiped and present an

^{*} Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-01-00869).

algorithm of dilatometric calculation for a pair of points randomly chosen on these sides. The calculation is based on the data obtained from the interferogram covering all four lateral sides of the sample due to the special arrangement of the optical scheme. The examples presented in the article show that when solid samples and samples with a through hole are subjected to gradually increasing compression, areas of possible destruction can be identified by areas of concentration of interference fringes. Areas with microcracks can be identified by ruptures in the interference fringe continuity.

Keywords: panoramic speckle interferometry, sample, parallelepiped, gypsum, uniaxial compression, lateral faces, normal displacement.

Электронная спекл-интерферометрия является одним из современных методов экспериментальных исследований материалов и конструкций. Ее преимущества — бесконтактность измерения, совмещенная с возможностью оперативной регистрации полного поля перемещений поверхности объекта наблюдения при субмикронной точности измерений.

В последнее время методы спекл-интерферометрии стали применять и в dilatометрических измерениях. Это вызвано появлением большого количества материалов с анизотропией свойств заготовок, полученных методами порошковой металлургии, механическая обработка которых для изготовления образцов стандартного вида затруднена или экономически нецелесообразна, кроме того, в некоторых случаях требуется получение большего объема информации, чем обеспечивают обычные dilatометры [1].

К таким объектам относятся и образцы, выполненные из микропористых материалов, в частности керамик и гипса, некоторые механические свойства которых обладают трехосной анизотропией [2]. При испытании таких образцов на сжатие возникают проблемы определения мест концентрации напряжений, влияния естественных и специально созданных дефектов на процессы предразрушения образцов. Все эти явления находят отражение в кинетике перемещений незагруженных боковых поверхностей образцов, которые не регистрируются обычными методами.

Цель работы — приложение метода спекл-интерферометрии к регистрации полей нормальных перемещений боковых поверхностей образцов в форме прямоугольных параллелепипедов, сжимаемых в прессе по торцевым плоскостям.

Для достижения этой цели потребовалось модернизировать оптическую схему спекл-интерферометра так, чтобы можно было проводить одновременно с лицевой наблюдать и другие грани боковой поверхности параллеле-

пипеда. Модернизацию проводили на основе работ [3–5].

При совместном использовании спекл-интерферометра и установки для механических испытаний проблемой являются вибрационные помехи от электропривода установки. В работе предложен и описан вариант снижения влияния вибрационных помех путем закрепления основы оптической схемы интерферометра на неподвижной плите прессы.

Описаны эксперименты по регистрации кинетики перемещений боковых поверхностей гипсовых образцов при испытаниях на продольное сжатие. Рассмотрены образцы — параллелепипеды: сплошные, с косым надрезом и со сквозным поперечным отверстием. Приведены интерферограммы характерных полей перемещений на боковых поверхностях образцов, а также интерферограммы, указывающие на области будущего разрушения образцов при постепенном увеличении сжатия.

Приведены пример построения полей перемещений на боковых гранях параллелепипедов и алгоритм dilatометрического расчета для пары точек, произвольно выбранных на этих гранях по данным, полученным из интерферограммы.

Использование спекл-интерферометрии для регистрации перемещений по всей боковой поверхности объекта наблюдения. Применение электронной спекл-интерферометрии обычно ограничивается регистрацией поля перемещений лицевой стороны объекта, обращенной к потоку падающих когерентных лучей лазера и регистрирующей аппаратуре [6, 7]. Для регистрации перемещений по всей боковой поверхности объекта наблюдения потребовалась модернизация оптической схемы, построенной по классической схеме Майкельсона [8].

Для улучшения освещения и снятия оптической информации с тыльных сторон образца при имеющемся относительно маломощном (20 мВт) лазере в оптическую схему интерфе-

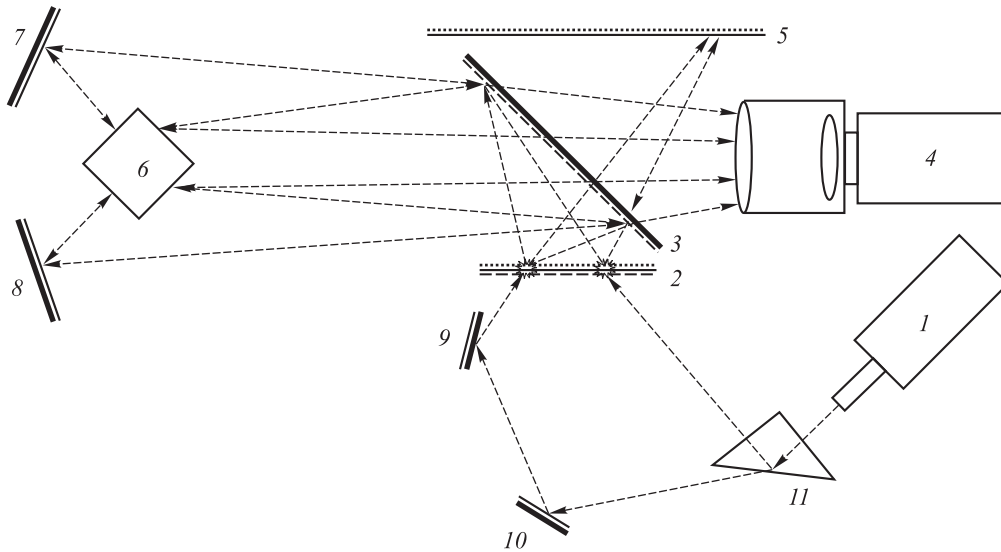


Рис. 1. Оптическая схема 3D-спекл-интерферометра:
1 — лазер; 2 — матовое стекло; 3 — полупрозрачное зеркало; 4 — видеокамера; 5 — диффузный отражатель;
6 — образец; 7–10 — зеркала; 11 — делительная призма

рометра Майкельсона были введены дополнительные оптические элементы. Модернизированная оптическая схема 3D-спекл-интерферометра приведена на рис. 1. Для повышения качества интерферограмм желательно, чтобы образец имел со всех четырех сторон матовую отражающую поверхность с примерно одинаковой отражающей способностью.

Принцип действия 3D-спекл-интерферометра состоит в том, что луч лазера 1 разделяется по амплитуде на две части; одна из них, отразившись от внутренней поверхности призмы 11, попадает в определенную зону матового стекла 2, а другая, выйдя из призмы, с помощью поворотных зеркал 9 и 10 направляется в другую зону этого же стекла. После прохождения через матовое стекло формируются два спекл-источника расходящейся волны, показанные на рис. 1 звездочками. Излучение этих источников разделяется по амплитуде с помощью полупрозрачного зеркала 3 и направляется одной частью на освещение образца 6, а другой частью — на освещение диффузного отражателя 5.

Формирование предметного пучка происходит при диффузном отражении лучей от боковых поверхностей образца: от передней полушеры — непосредственно, а от задней — с помощью поворотных зеркал 7 и 8. Следует отметить, что задняя сторона образца наблюдается видеокамерой в виде двух частей, видимых в кадре справа и слева от изображения передней стороны, и что в результате использования одиночных поворотных зеркал 7, 8 каждая из

этих частей наблюдается в зеркальном отражении, т. е. правая и левая стороны в них меняются местами. Опорный пучок формируется при диффузном отражении лучей от опорной поверхности.

Сформированные таким образом предметный и опорный пучки соединяются и направляются с помощью полупрозрачного зеркала 3 в сторону видеокамеры 4, объектив которой может быть сфокусирован на среднее расстояние до образца, а при недостатке глубины резкости — на ту или иную часть поверхности образца. При дефокусировании работа спекл-интерферометра не нарушается, но определять координаты точек на поверхности образца становится трудно.

Конструктивные особенности 3D-спекл-интерферометра при его использовании совместно с прессом. Использование спекл-интерферометра совместно с прессом осложняли вибрационные помехи от электропривода пресса, которые приводили к существенному ухудшению качества интерферограммы вплоть до ее исчезновения. Влияние вибрационных помех было снижено путем закрепления основы оптической схемы интерферометра на нижней плите пресса. Этим обеспечивалась неподвижность образца по отношению к оптическому блоку.

Для вывешивания оптического блока на нижней плите пресса была изготовлена дополнительная рама с противовесом. На рис. 2 пока-

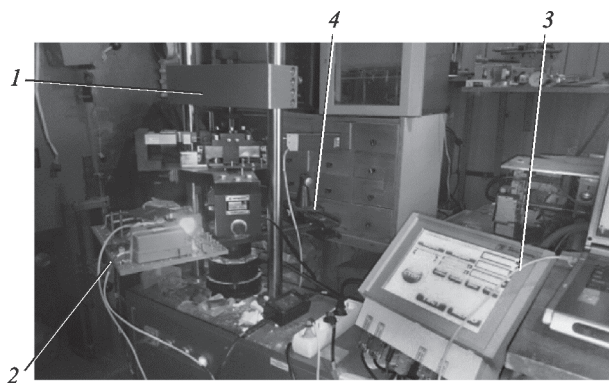


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки:
1 — пресс ДТС-06-100; 2 — 3D-спекл-интерферометр;
3 — блок управления прессом; 4 — противовес
оптического блока

зан пресс ДТС-06-100 1 с размещенным на нем 3D-спекл-интерферометром 2, а также блок управления прессом 3 и противовес оптического блока 4.

Экспериментальные исследования полей перемещений боковых поверхностей гипсовых параллелепипедов при одноосном сжатии.

Экспериментальные исследования проводились при минимальной скорости одноосного нагружения, допускаемой прессом, составлявшей 1 мм/мин. Тем не менее для интерферометрической регистрации перемещений эта скорость была очень высокой, так как 1 мм/мин \approx \approx 17 мкм/с при чувствительности спекл-интерферометра 0,25 мкм на одну интерференционную полосу, т. е. за 1 с появлялось столько полос, что при реальной скорости формирования электронных спекл-интерферограмм (3 кадра/с), которую обеспечивала сетевая трехмегапиксельная камера оптического блока интерферометра, в отдельные кадры попадало столько полос, что они переставали разрешаться.

Для уравнивания скорости продольной деформации образцов со скоростью спекл-интерферометрической регистрации перемещений на их боковых поверхностях между подвижной плитой прессы и образцом укладывали одну или две шайбы из прессованной резины, имеющей модуль упругости примерно в 100 раз меньший, чем у гипса. Но и в этом случае приходилось вручную делать остановки в нагружении через минимально возможные промежутки времени с регистрацией на каждой стадии новой спекл-интерферограммы, чтобы регистрируемые перемещения при нагружении не давали слишком много полос.

На образце с неоднородными свойствами, геометрией и граничными условиями, несоосностью вектора нагрузки с продольной осью создается в общем случае поле перемещений, различающееся по разным граням боковой поверхности образца. Далее приведены результаты 3D-спекл-интерферометрии при сжатии образцов: сплошного гипсового, с диагональным надрезом по одной из боковых граней и со сквозным отверстием, проходящим через центры двух противоположных боковых граней.

Испытания сплошных гипсовых образцов.

На рис. 3 приведена снятая через оптический блок фотография одного из образцов перед нагружением в прессе, где через *A, B* обозначают передние грани, а через *C, D* — задние. Размеры образца: высота — 50 мм, в поперечном сечении — квадрат со стороной 25 мм. Нагружение проводилось пошагово для того, чтобы на интерферограммах записывалось легко считываемое число полос при соответствующих изменениях в поле перемещений боковой поверхности образца, произошедших между шагами. Для каждого из шагов регистрации на интерферограммах поля перемещений боковой поверхности образца использовали следующие значения нагружающего усилия *P, Н*: 745...832, 934, 1 063, 1 120, 1 130, 1 137, 1 256, 1 390, 1 548, 1 710, 1 868, 1 980, 2 120, 2 273, 2 375, 2 643, 2 964, 3 200, 3 408, 3 630, 3 830, 3 874, 4 190, 4 200, 4 247, 4 570, 4 735, 5 030, 4 979, 4 874, 4 978, 4 860, 4 794, 5 040, 5 272, 5 413, 5 609, 5 798, 5 964, 6 213, 6 376, 6 460, 6 705, 7 075, 5 070.

На рис. 4 приведены некоторые характерные интерферограммы на разных стадиях нагружения образца. На начальной стадии (до 1 130 Н) поле перемещений боковой поверхности параллелепипеда распределяется достаточно равномерно по высоте. Полосы интерферограммы

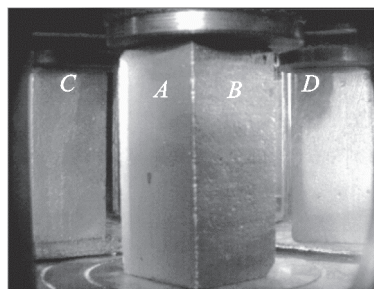


Рис. 3. Панорамный вид образца в прессе перед нагружением:
A, B и *C, D* — соответственно передние и задние грани параллелепипеда

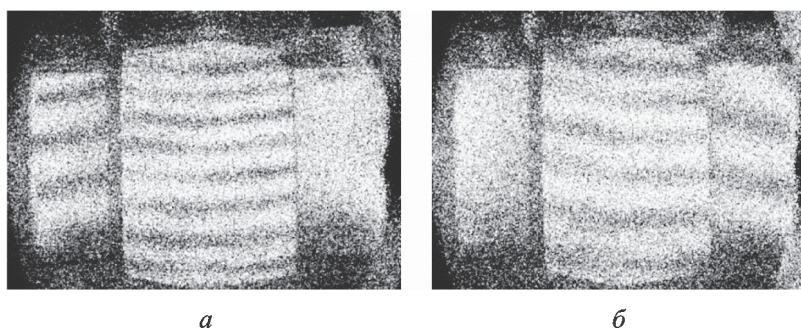


Рис. 4. Перемещения боковой поверхности параллелепипеда на начальной стадии нагружения:
а — $P = 745 \dots 832$ Н; *б* — $P = 934 \dots 1063$ Н

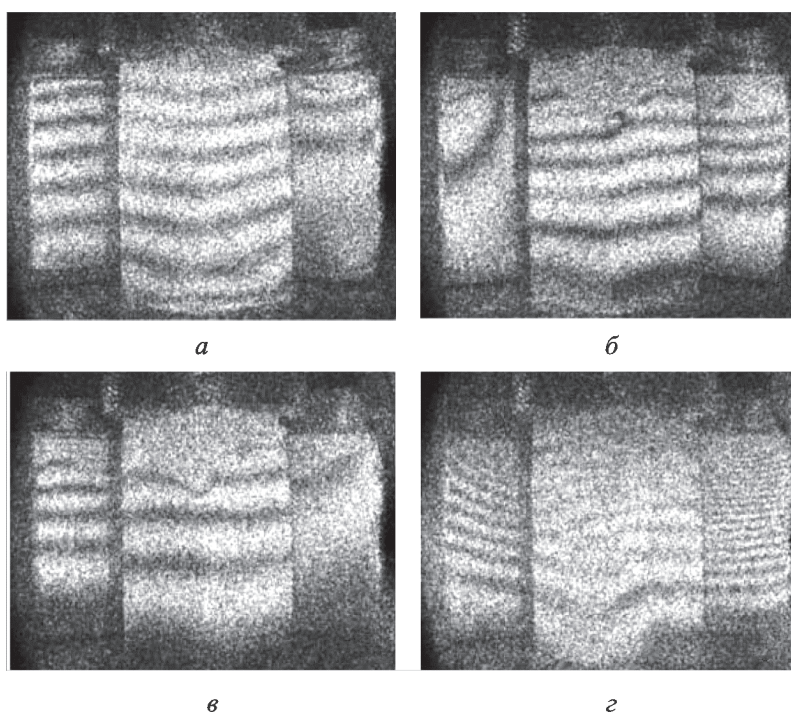


Рис. 5. Интерферограммы, указывающие на места будущих дефектов:
а — концентрация полос в верхней части правой задней грани; *б* — концентрация полос в верхней части передней грани;
в — концентрация полос в верхней части левой задней грани;
г — разрывы полос на левой передней грани параллелепипеда

практически прямые. В большей или меньшей степени поперечные смещения заметны то на левой (рис. 4, *а*), то на правой задней гранях параллелепипеда (рис. 4, *б*).

При дальнейшем нагружении в окрестности торцов образца формируются места будущих трещин и отколов, что иллюстрируют интерферограммы (рис. 5). Так, на рис. 5, *а* видна концентрация полос в верхней части правой задней грани параллелепипеда (при нагрузке 1 390 Н), на рис. 5, *б* — концентрация полос в верхней части передней грани (при нагрузке 4 200 Н), а на рис. 5, *в, г* — в верхней части левой задней грани параллелепипеда (при нагрузке до 5 030 Н). На рис. 5, *г* заметны также разрывы полос на левой передней грани параллелепипеда,

свидетельствующие о месте появления продольной трещины по высоте параллелепипеда.

При последующем увеличении продольного смещения нагрузка то снижалась, то возрастала. При этом образовывались трещины и отколы в местах, на которые указывали интерферограммы (см. рис. 5). На рис. 6, *а* показаны такие дефекты при снижении нагрузки с 5 030 до 4 979 Н, а на рис. 6, *б* — с 7 075 до 5 070 Н, после чего испытание было прекращено.

Другой образец из того же материала, напротив, при сжатии разрушился преимущественно в нижней части. Интерферограммы с расположением полос, указывающим на места будущего разрушения, приведены на рис. 7, *а, б*, а образец после разрушения — на рис. 7, *в*. Сле-

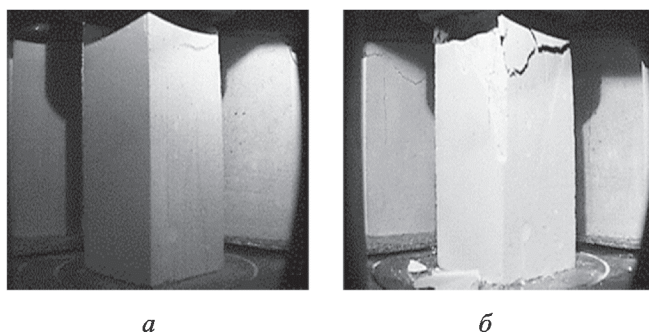


Рис. 6. Внешний вид первого образца на начальной стадии разрушения (а) и после окончания испытаний (б)

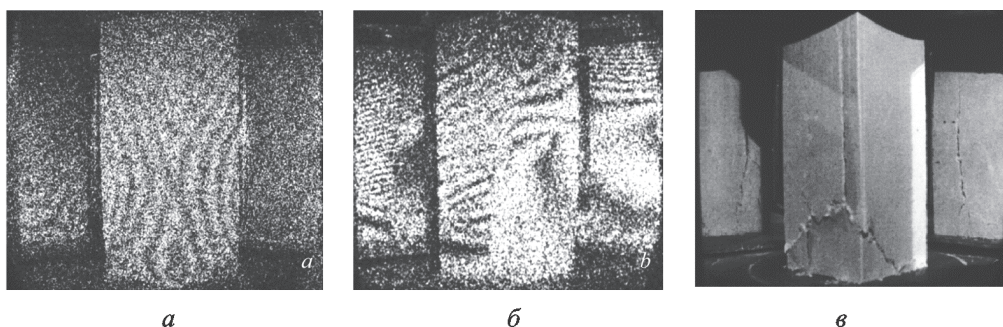


Рис. 7. Интерферограммы для стадий предразрушения второго образца (а, б) и его внешний вид после окончания испытаний (в)

дует отметить, что на рис. 7, б видны разрывы полос на левой передней грани параллелепипеда вдоль линии, совпадающей с линией прохождения будущей вертикальной трещины, отчетливо проступившей на рис. 7, в.

Испытания параллелепипеда с диагональным надрезом. Испытаниям также подвергался гипсовый образец с диагональным надрезом по одной из боковых граней. В таблице приведены результаты пошагового нагружения гипсового образца с диагональным надрезом в виде значений усилия P и продольного смещения V по данным монитора прессы.

P , Н	V , мм	P , Н	V , мм
370	0,047	1 290	0,240
734	0,123	1 443	0,254
747	0,144	1 523	0,263
756	0,153	1 630	0,272
777	0,166	1 677	0,281
812	0,179	1 781	0,297
896	0,195	2 000	0,342
1 010	0,209	2 150	0,677
1 309	0,241	2 200	0,680

Из таблицы видно, что связь между нагрузкой P и продольным смещением V близка к линейной (рис. 8).

На рис. 9 показаны интерферограммы нормальных перемещений обращенной к интерферометру грани параллелепипеда с надрезом для некоторых этапов нагружения, соответствующих данным таблицы при различных максимальных значениях сжимающего усилия по окончании этапа.

Установлено, что до уровня нагружения 1 010 Н части гипсового образца, расположенные выше и ниже надреза, воспринимали нагрузку примерно одинаково; соответственно, и нормальные перемещения в этих частях образца близки по величине. На этой стадии нагружения количество интерференционных полос равномерно возрастает, что свидетельствует о линейном поле перемещений образца.

При дальнейшем увеличении нагрузки части образца, отделенные наклонным надрезом, воспринимают ее по-разному: на верхней части образца по сравнению с нижней, количество полос заметно возрастает. В результате верхняя часть образца начинает соскальзывать относительно нижней части по линии надреза, что свидетельствует об иницировании разрушения образца в окрестности плоскости надреза.

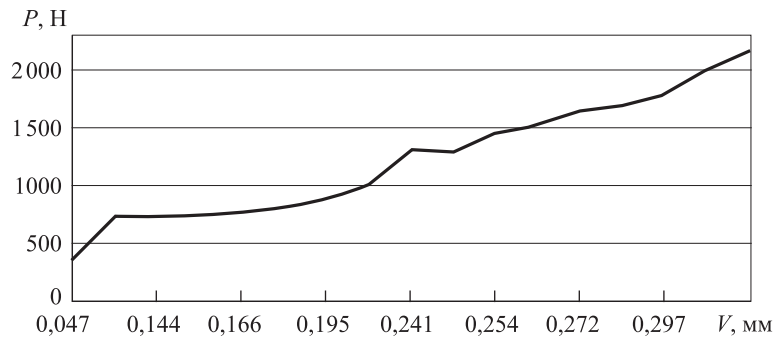


Рис. 8. Связь между сжимающим усилием P и продольным смещением V верхней грани образца

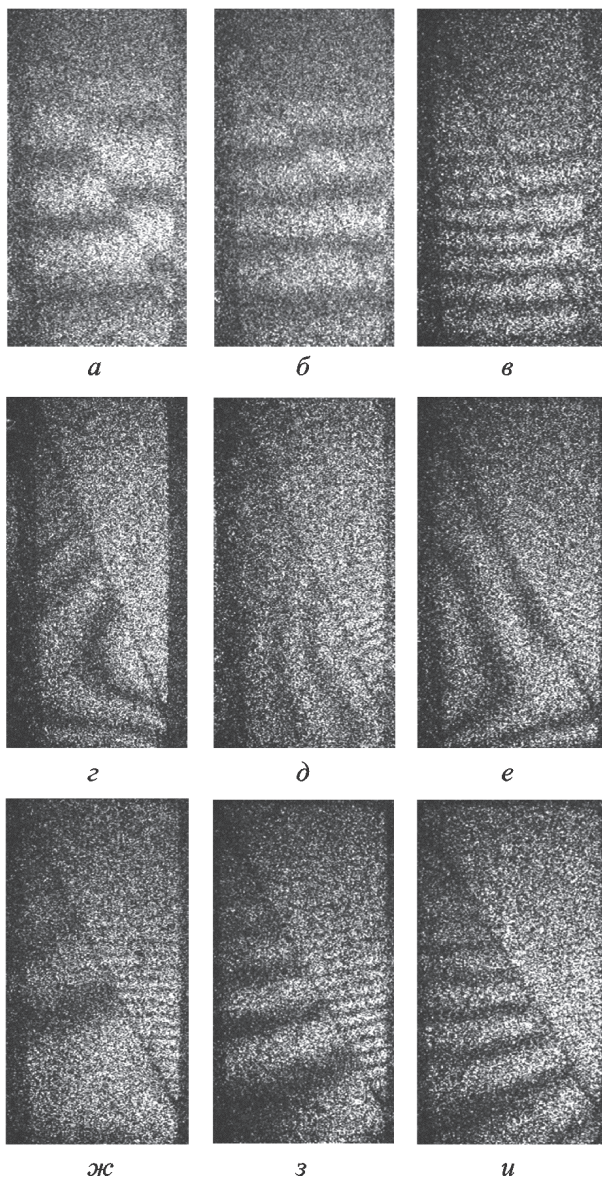


Рис. 9. Интерферограммы на некоторых стадиях нагружения гипсового образца с диагональным разрезом:

а — $P = 734$ Н; б — $P = 747$ Н; в — $P = 896$ Н;
 г — $P = 1\,290$ Н; д — $P = 1\,443$ Н; е — $P = 1\,523$ Н;
 ж — $P = 1\,630$ Н; з — $P = 2\,000$ Н; и — $P = 2\,150$ Н

Нижняя часть образца при этом деформируется однородно и сохраняет несущую способность (ситуация продольного сдвига по плоскости надреза).

Испытания гипсового параллелепипеда со сквозным поперечным отверстием. Для оценки возможности спекл-интерферометрического наблюдения за изменениями в поле перемещений, создаваемыми локальным искусственным концентратором напряжений, проводили испытание на сжатие образца со сквозным отверстием, просверленным через середины его противоположных боковых граней (рис. 10).

Для каждого из шагов регистрации на интерферограммах поля перемещений боковой поверхности образца использовали следующие значения нагружающего усилия P , Н: 270...302, 330, 365, 416, 481, 534, 583, 670, 774, 920, 1 146, 1 246, 1 350, 1 430, 1 540, 1 680, 1 860, 1 980, 2 130, 2 500, 2 620, 2 730, 3 150, 4 000, 4 600, 5 000, 5 500, 6 000, 6 300, 6 500, 7 000, 7 200, 7 500, 7 700, 8 000, 8 300, 8 500, 8 800, 9 000, 9 300, 9 500, 9 800, 10 000, 10 300, 10 500, 10 700, 11 000, 11 300.

Приведем характерные интерферограммы на разных стадиях нагружения. На начальных стадиях (до 1 350 Н) поле перемещений боковой поверхности образца изменяется без заметного влияния на него отверстия: полосы интерферограммы практически прямые и распределены

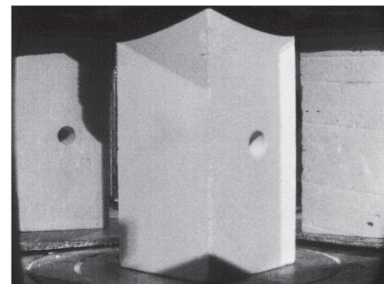


Рис. 10. Внешний вид образца с отверстием

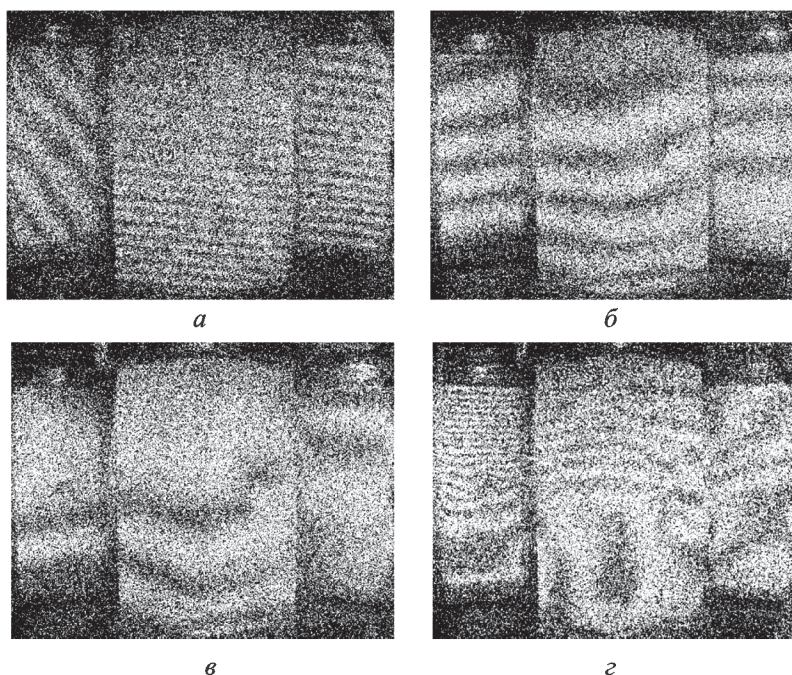


Рис. 11. Перемещения боковой поверхности параллелепипеда с отверстием на различных стадиях нагружения:
a — $P = 330 \dots 365$ Н; *б* — $P = 1\,246 \dots 1\,350$ Н; *в* — $P = 1\,430 \dots 1\,540$ Н; *г* — $P = 8\,300 \dots 8\,500$ Н

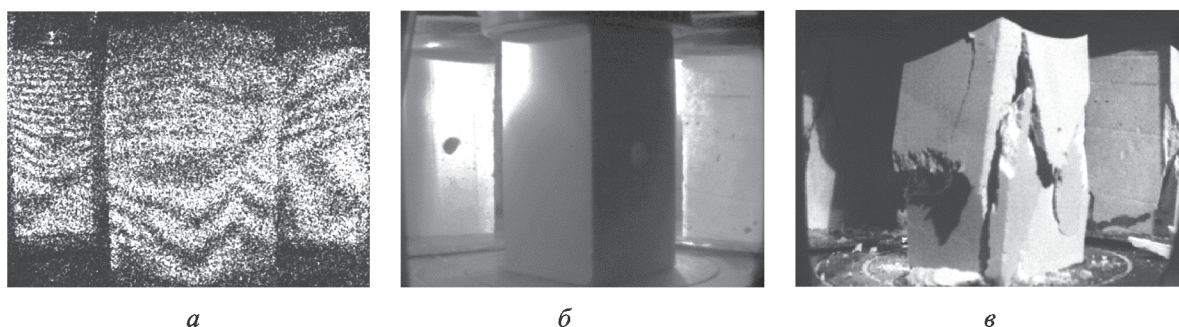


Рис. 12. Интерферограмма (*a*) и внешний вид образца на стадии предразрушения (*б*) и на следующем шаге нагружения (*в*)

равномерно по всем боковым граням параллелепипеда (рис. 11, *a* и *б*).

При дальнейшем повышении нагрузки влияние концентратора становится заметнее. Характерные интерферограммы для диапазонов нагрузок $1\,430 \dots 1\,540$ Н и $8\,300 \dots 8\,500$ Н приведены соответственно на рис. 11, *в* и *г*. Здесь на фоне равномерного нормального перемещения правой передней грани параллелепипеда сформировался лепесток розетки у края отверстия, характерный для данного типа концентратора. На рис. 11, *г* влияние концентратора заметно как на передней, так и на задней гранях образца.

Интерферограмма для стадии предразрушения образца в диапазоне нагрузок $10\,700 \dots 11\,000$ Н приведена на рис. 12, *a*. На ней заметны вертикальные сдвиги полос по центрам пра-

вой передней и левой задней граней, свидетельствующие о появлении вертикальных трещин, проходящих через отверстие. Однако они настолько малы, что не видны невооруженным глазом (это иллюстрирует рис. 12, *б*, где образец выглядит целым). Следующий шаг нагрузки (до $11\,300$ Н) приводит к усилению сдвига полос и разрушению образца (рис. 12, *в*). Таким образом, показана возможность прогнозирования с помощью интерферограмм повреждений образца, не фиксируемых при оптическом наблюдении, но приводящих к его разрушению при малом дополнительном нагружении.

Построение полей перемещений боковых поверхностей параллелепипедов и дилатометрические измерения на основе 3D-спекл-ин-

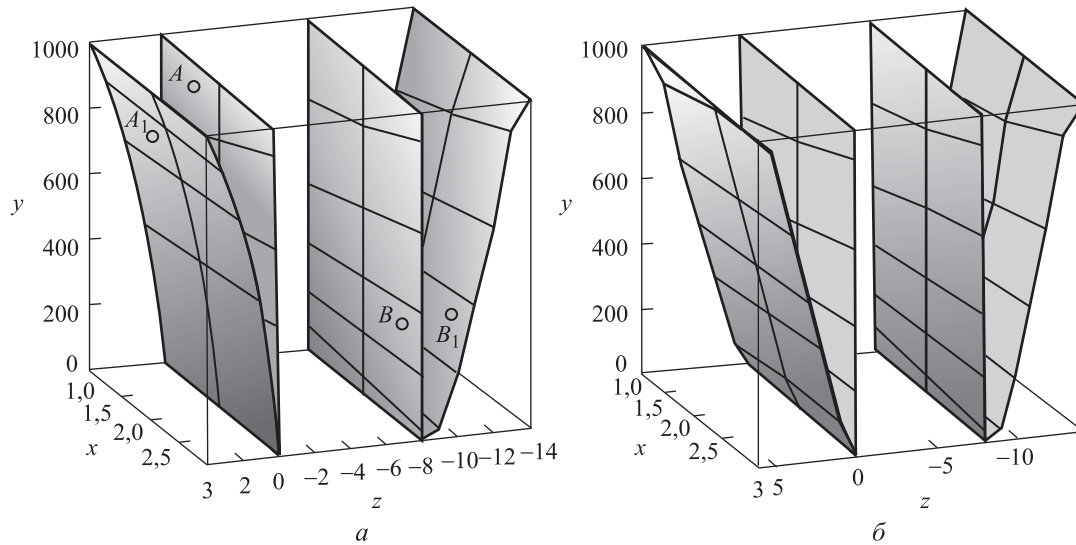


Рис. 13. Формы нормальных перемещений для правой задней и левой передней (а) и для левой задней и правой передней (б) граней параллелепипеда

терферограмм. На основании полученных интерферограмм можно построить формы поперечных отклонений боковых поверхностей образцов на каждой стадии нагружения. Принцип такого построения в простейшем варианте заключается в оцифровке координат линий уровня нормальных смещений боковых граней параллелепипеда, соответствующих центрам полос интерферограммы.

В качестве примера рассмотрим построение форм поперечных отклонений граней параллелепипеда с помощью интерферограммы, приведенной на рис. 11, б. Принимая нижнюю грань образца за неподвижную и отсчитывая от нее уровни перемещений по координатам центров темных интерференционных полос, приписываем ближайшим к нижней грани полосам смещение 0,265 мкм, для следующих полос — 0,265·2 мкм и т. д., получая набор значений перемещений, которые могут быть отображены в виде поверхностей в пространстве. Такие поверхности построены попарно для правой задней и левой передней (рис. 13, а) и для левой задней и правой передней (рис. 13, б) граней параллелепипеда. Исходные положения соответствующих граней показаны в виде вертикальных прямоугольников.

Для полученных форм нормальных перемещений граней параллелепипеда проведем дилатометрический расчет для любых двух точек, взятых на этих гранях. Например, на правой задней грани (рис. 13, а) выберем точку $A(x_1, y_1, z_1)$, а на левой передней — точку $B(x_2, y_2, z_2)$. Расстояние между ними определим по формуле

$$r_0 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

После стадии сжатия образца, отображенной полем перемещений на рис. 13, а, точка $A(x_1, y_1, z_1)$ переходит в точку $A_1(x_3, y_3, z_3)$ искривленной поверхности, а точка $B(x_2, y_2, z_2)$ — в точку $B_1(x_4, y_4, z_4)$. При этом

$$x_j = k_j w_j; \quad y_3 = y_4 = V; \quad z_j = N_j \lambda / 2; \quad j = 3, 4, \quad (1)$$

где w_3 и w_4 — нормальные перемещения вертикальных ребер параллелепипеда, ближайших к точкам A и B соответственно; k_j — коэффициенты пропорциональности, определяемые из условия сохранения положения вертикальной оси симметрии параллелепипеда; V — вертикальное смещение, измеряемое датчиком прессы; N_3 и N_4 — число полос интерферограммы от нижней грани параллелепипеда до точек A_1 и B_1 соответственно; λ — длина волны лазера.

Определяя с учетом (1) расстояние между точками A_1 и B_1 по формуле

$$r_1 = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2} \quad (2)$$

и используя разность

$$\Delta r = r_1 - r_0, \quad (3)$$

получим искомый дилатометрический результат по изменению расстояния между этими точками в процессе данной стадии нагружения образца. При необходимости измерения дилатансии по всей боковой поверхности образца на каждой из граней деформированной по-

верхности параллелепипеда должен быть взят набор характерных точек в соответствии с особенностями расположения интерференционных полос, для которых, исходя из соотношений (1), определяют исходные положения этих точек на недеформированной поверхности. Найденные координаты точек в исходном и деформированном состоянии подставляют в соотношение (2), а затем — в (3). Эту процедуру можно автоматизировать и в дальнейшем выполнять с помощью ЭВМ.

Выводы

1. Показаны возможности панорамной спекл-интерферометрии по регистрации полей нормальных перемещений боковых поверхностей образцов в форме прямоугольных параллелепипедов в процессе их продольного сжатия в прессовой установке. Приведена оптическая схема 3D-спекл-интерферометра, обеспечивающая одновременную регистрацию на одной спекл-интерферограмме перемещений по всем четырем боковым граням образца, что может

быть использовано при дилатометрических измерениях. Решена проблема снижения вибрационных помех путем закрепления основы оптической схемы интерферометра на неподвижной плите прессы.

2. Представлены результаты экспериментов, показывающие кинетику перемещений боковых поверхностей гипсовых образцов при испытаниях на продольное сжатие. Приведены характерные интерферограммы полей перемещений на боковых поверхностях образцов при постепенном нарастании сжимающего напряжения, среди которых выделены интерферограммы, указывающие на незаметные невооруженным глазом области будущего разрушения сплошных образцов и образцов с искусственно созданными дефектами: косым надрезом и сквозным поперечным отверстием. Представлен пример построения полей перемещений на боковых гранях образцов, а также алгоритм дилатометрического расчета для пар точек, произвольно выбранных на этих гранях по данным, полученным из интерферограммы.

Литература

- [1] Компан Т.А. Измерительные возможности и перспективы развития дилатометрии. *Мир измерений*, 2011, № 7, с. 14–21.
- [2] Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., ред. *Физические величины: Справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [3] Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Подлесных А.В., Попов А.Л., Солодовников С.И., Челюбеев Д.А. *Способ дилатометрии*. Пат. 2559797 Российская Федерация, 2015, бюл. № 22, 6 с.
- [4] Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Попов А.Л., Солодовников С.И., Челюбеев Д.А. *Интерференционный дилатометр*. Пат. 153452 Российская Федерация, 2015, бюл. № 20, 2 с.
- [5] Goldstein R.V., Popov A.L., Kozintsev V.M., Chelubeev D.A. Some new applications of ESPI at the mechanical tests. *Meccanica*, 2015, vol. 50 (2), pp. 389–399.
- [6] Клименко И.С. *Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия*. Москва, Наука, 1985. 224 с.
- [7] Гужов В.И., Ильиных С.П. *Компьютерная интерферометрия*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2003. 405 с.
- [8] Джоунс Р., Уайкс К. *Голографическая и спекл-интерферометрия*. Москва, Мир, 1986. 328 с.

References

- [1] Kompan T.A. Izmeritel'nye vozmozhnosti i perspektivy razvitiia dilatometrii [Measurement capabilities and prospects of development of dilatometry]. *Mir izmerenii* [World of measurement]. 2011, no. 7, pp. 14–21.
- [2] *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [The physical quantities. Guide]. Ed. Grigor'ev I.S., Melikhov E.Z. Moscow, Energoatomizdat publ., 1991. 1232 p.

- [3] Gol'dshtein R.V., Kozintsev V.M., Podlesnykh A.V., Popov A.L., Solodovnikov S.I., Cheliubeev D.A. *Sposob dilatometrii* [Method of dilatometry]. Patent RF, no. 2559797, 2015.
- [4] Gol'dshtein R.V., Kozintsev V.M., Popov A.L., Solodovnikov S.I., Cheliubeev D.A. *Interferentsionnyi dilatometr* [Interference dilatometer]. Patent RF, no. 153452, 2015.
- [5] Goldstein R.V., Popov A.L., Kozintsev V.M., Chelubeev D.A. Some new applications of ESPI at the mechanical tests. *Meccanica*, 2015, vol. 50, is. 2, pp. 389–399.
- [6] Klimenko I.S. *Golografiia sfokusirovannykh izobrazhenii i spekl-interferometriia* [Holography of focused images and speckle-interferometry]. Moscow, Nauka publ., 1985. 224 p.
- [7] Guzhov V.I., Il'inykh S.P. *Komp'yuternaia interferometriia* [Computer interferometry]. Novosibirsk, NSTU publ., 2003. 405 p.
- [8] Dzhouns R., Uaiks K. *Golograficheskaya i spekl-interferometriia* [Holographic and speckle interferometry]. Moscow, Mir publ., 1986. 328 p.

Статья поступила в редакцию 08.02.2016

Информация об авторах

ГОЛЬДШТЕЙН Роберт Вениаминович (Москва) — член-корреспондент РАН, зав. лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций. ИПМех РАН (119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, e-mail: goldst@ipmnet.ru).

КОЗИНЦЕВ Виктор Михайлович (Москва) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций. ИПМех РАН (119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, e-mail: kozincev@mail.ru).

ОСИПЕНКО Николай Михайлович (Москва) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций. ИПМех РАН (119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, e-mail: osipnm@mail.ru).

ПОПОВ Александр Леонидович (Москва) — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, профессор кафедры «Сопротивление материалов» НИУ МГСУ (119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, e-mail: popov@ipmnet.ru).

ЧЕЛЮБЕЕВ Дмитрий Анатольевич (Москва) — младший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций. ИПМех РАН (119526, Москва, Российская Федерация, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, e-mail: da-ch@yandex.ru).

Information about the authors

GOLDSHTEIN Robert Veniaminovich (Moscow) — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Head of Laboratory of Mechanics of Strength and Fracture of Materials and Structures. Institute for Problems in Mechanics, The Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1, e-mail: goldst@ipmnet.ru).

KOZINTSEV Viktor Mikhailovich (Moscow) — Candidate of Science (Physics & Math), Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Strength and Fracture of Materials and Structures. Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1, e-mail: kozincev@mail.ru).

OSIPENKO Nikolay Mikhailovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Mechanics of Strength and Fracture of Materials and Structures. Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1, e-mail: osipnm@mail.ru).

POPOV Aleksandr Leonidovich (Moscow) — Doctor of Science (Physics & Math), Leading Researcher, Laboratory of Mechanics of Strength and Fracture of Materials and Structures. Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Strength of Materials, National Research University, Moscow State University of Civil Engineering (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1, e-mail: popov@ipmnet.ru).

CHELUBEEV Dmitriy Anatolievich (Moscow) — Junior Researcher, Laboratory of Mechanics of Strength and Fracture of Materials and Structures. Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences (119526, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 101, Block 1, e-mail: da-ch@yandex.ru).