



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПОЛОСТЯМИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

В. И. Востриков, С. Ю. Гаврилов, П. А. Цой

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vvi.49@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

На моделях из оргстекла с цилиндрическим отверстием проведено физическое моделирование для исследования деформационных процессов при квазистатической нагрузке. Регистрировались тепловое и деформационное поля. Их анализ показал, что в модели возникают четыре области: две — слева и справа от полости, которые воспринимают основную нагрузку, и две — сверху и снизу от нее, подверженные небольшим нагрузкам. Высокие значения температуры регистрируются на боковых поверхностях отверстия, что указывает на значительные деформации этих участков. При сбросе нагрузки температура модели резко падает, становится меньше температуры окружающей среды и в дальнейшем постепенно повышается.

Физическая модель, стенд, квазистатическое нагружение, деформация, тепловое поле

**STUDY OF DEFORMATION PROCESSES IN PHYSICAL MODELS
WITH TECHNOLOGICAL CAVITIES UNDER QUASI-STATIC LOADING**

V. I. Vostrikov, S. Yu. Gavrilov, and P. A. Tsoi

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
E-mail: vvi49@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Physical modeling was carried out to study deformation processes on plexiglass models with cylindrical cavity under quasistatic loading. Thermal and strain fields were measured during the experiments. The thermal field analysis revealed four regions in the model: two of them are located to the left and to the right of the cavity (those receiving the main load), and two are above and below the cavity. The high temperature values recorded on the lateral surfaces of the cavity indicated their significant deformation. When the applied load was taken off, the model temperature decreased sharply (due to reverse deformation) to the extent that it became lower than the ambient temperature, and then gradually increased.

Physical model, test bench, quasi-static loading, deformation, thermal field

Для исследования процессов деформирования и разрушения на физических моделях в данной работе применяется метод инфракрасной термографии (ИКТ), основное преимущество которого — бесконтактное измерение температуры различных объектов с высокой точностью. Основной областью использования этого метода в России является неразрушающий контроль. Это направление развивается в лаборатории НИИ интроскопии Национального исследовательского Томского политехнического университета под руководством проф. В. П. Вавилова. За рубежом метод ИКТ получил широкое распространение при решении задач механики деформируемого твердого тела: в США (P. Rosakis, A. J. Rosakis), в Италии (A. Risitano, G. Meneghetti), в Польше (W. Oliferuk), во Франции (A. Chrysochoos, M. Luong) и в некоторых других странах [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282), Госзадание № АААА-А17-117121140065-7 на оборудовании ЦКП геомеханических, геофизических и геодинамических измерений СО РАН.

Физической основой метода ИКТ является регистрация и измерение величины инфракрасного излучения объекта с помощью специальных приборов — тепловизоров. Длины волн, излучаемые телом, зависят от его температуры нагревания: чем выше температура, тем короче длина волны и выше интенсивность излучения.

В условиях постоянного развития инфракрасной техники метод ИКТ позволяет в реальном времени измерять температуру материала при деформировании и рассчитывать термическую энергию и скорость диссипации энергии. Инфракрасный мониторинг на сегодняшний день — один из универсальных методов для определения температуры поверхности тел, обнаружения и отслеживания источников тепла. Его активно применяют в различных областях знаний: медицине, авиации, мостостроении и т. д. Задачи по исследованию источников тепла ставятся и в области механики разрушения и механики трещин. Одна из положительных сторон инфракрасной термографии для исследования процессов диссипации и накопления энергии при усталостных испытаниях состоит в том, что не требуется вносить изменения в стандартные схемы механических экспериментов.

Современные модели деформирования и разрушения материалов базируются на описании связи накопленной энергии в процессе деформирования и плотности основных носителей пластической деформации, которая играет важнейшую роль в сценарии зарождения и эволюции дефектов, что неоднократно было показано в большом количестве экспериментальных работ и подтверждено результатами численного моделирования этого процесса [2]. В [3] область концентрации напряжений соответствует площади изменяющейся температуры, а деформации сжатия и площади растяжения — области высокой или низкой температуры, где возрастают сигналы акустической эмиссии (АЭ).

Природные бедствия, такие как землетрясения, происходящие в результате тектонической активности, а также катастрофы из-за техногенной деятельности вызывают проявление различных физических полей: напряжений, деформаций, температурных, сейсмических и др. Решением проблемы раннего предупреждения стихийных бедствий занимаются многие исследователи в различных странах. В конце прошлого века проведено несколько экспериментов на образцах горных пород при их нагружении до разрушения [1, 3–6]. Регистрировалось изменение температурного поля от геомеханического состояния образца. В работе [7] эксперименты проводились на моделях из эпоксидной смолы.

Существует два вида тепловых эффектов, регулирующих изменение температурного поля в процессе нагрузки: термоупругое действие и эффект трения. На ранней стадии нагрузки температурное поле в значительной степени контролируется термоупругим эффектом. Изменение температуры линейно связано с суммарным изменением основных напряжений, растягивающих или сжимающих, вызывающих падение или повышение температуры. На этом этапе наблюдается небольшая деформация из-за более низкого напряжения, и изменение температуры не очевидно. На пластической стадии у образцов изменений деформации становится больше, а температурное поле, контролируемое эффектом трения, имеет высокую температуру [8].

В [9] исследование процессов деформирования и разрушения материала с регистрацией теплового поля проводилось на физических моделях, выполненных из оргстекла, с полостями в виде круга и усеченного эллипса различных размеров при вертикальных квазистатических и циклических воздействиях. Деформация модели под действием вертикальной статической нагрузки привела к образованию вертикальных разрывных нарушений сплошности по боковым сторонам отверстия, которые разделили модель на четыре области: две расположенные по центру сверху и снизу отверстия, которые практически не несут нагрузку, и две — справа и слева от отверстия, принимающие основную нагрузку. Характер изменения температурного поля при

различных значениях нагрузки позволяет определить местоположение зоны локализации микродеформаций, а также место выхода основного разрыва на поверхность образца при нагрузках, меньших пика, когда образец еще сохраняет целостность [9]. При проведении этих экспериментов был замечен эффект “исчезновения” температуры физической модели при резком сбросе нагрузки. Наиболее сильно этот эффект проявляется на предельной стадии нагрузки перед нарушением сплошности модели.

Данная работа посвящена исследованию процессов деформирования и характеристик тепловых полей на модели с полостью при действии квазистатической нагрузки. Эксперимент осуществлялся на стенде Центра коллективного пользования ИГД СО РАН. Он состоит из механического пресса и регистрирующей аппаратуры: тепловизора для записи теплового поля и многоканальной измерительной системы Solartron Metrology для деформационных измерений. Общий вид стенда с установленной в захватах пресса моделью приведен на рис. 1а.



Рис. 1. Общий вид стенда с физической моделью (а) и схематический вид модели с деформационными датчиками (б)

Физическая модель выполнена из оргстекла размерами $100 \times 100 \times 25$ мм с круглым отверстием в центре диаметром 40 мм. На рис. 1б представлен схематический вид модели с местами расположения шести датчиков для регистрации деформаций. Номер в скобках обозначает положение датчика на противоположной грани модели. Тепловизор находился под углом к модели, чтобы регистрировать температуру боковой и фронтальной плоскостей, а также внутренней боковой поверхности отверстия. Программа нагружения модели включала в себя три этапа: 1 этап — модель нагружается с постоянной скоростью до верхней границы упругой деформации, т. е. не доводится до нарушения сплошности; 2 этап — при достигнутой постоянной нагрузке модель выдерживается до полной диссипации температуры; 3 этап — быстрая разгрузка до нуля. На всех этапах регистрировалось тепловое поле и деформации на гранях модели.

1-й этап. Модель нагружалась на механическом прессе с постоянной скоростью 0.5 мм/мин до 85 кН. Температура модели повышалась, как это показано в экспериментах работы [4]. Применение механического пресса вместо гидравлического обусловлено тем, что после достижения максимальной нагрузки модель необходимо держать под этой нагрузкой достаточно продолжительное время до полного выравнивания ее температуры с температурой окружающего воздуха.

2-й этап. Нагружение остановлено. Модель находится под постоянной нагрузкой до полной диссипации температуры. Температура теплового поля выравнивалась и достигала значения комнатной температуры. Время диссипации составило примерно 1 ч. За это время значение нагрузки упало до 71.5 кН за счет пластической деформации модели.

На рис. 2 представлены зависимости смещений, зафиксированные шестью датчиками в измеряемых точках модели при нагружении на этапе 1 и при прекращении нагружения на этапе 2.



Рис. 2. Зависимости смещения от времени на этапах 1 и 2, полученные по показаниям датчиков: *a* — 1, 2; *б* — 3, 4; *в* — 5, 6

Датчики 1, 2 (рис. 2*a*), расположенные под отверстием, показали наименьшие смещения. После остановки нагружения участок модели под отверстием начал деформироваться в противоположную сторону, так как за счет наличия отверстия он подвергся меньшей нагрузке и не достиг предела текучести. Наибольшие значения деформации показали на датчиках 5 и 6 (рис. 2*в*), расположенные на торце модели.

3-й этап. Быстрая разгрузка со скоростью 50 мм/мин. На рис. 3 изображены смещения измерительных точек при “сбросе” нагрузки. Во время остывания модели (около 1 ч) система деформационных измерений была отключена. С началом выполнения этапа 3 система включалась и проводилась калибровка датчиков на нулевую отметку, поэтому графики начинаются с нуля. В течение 1.4 с модель была разгружена, после разгрузки датчики зафиксировали остаточную деформацию.

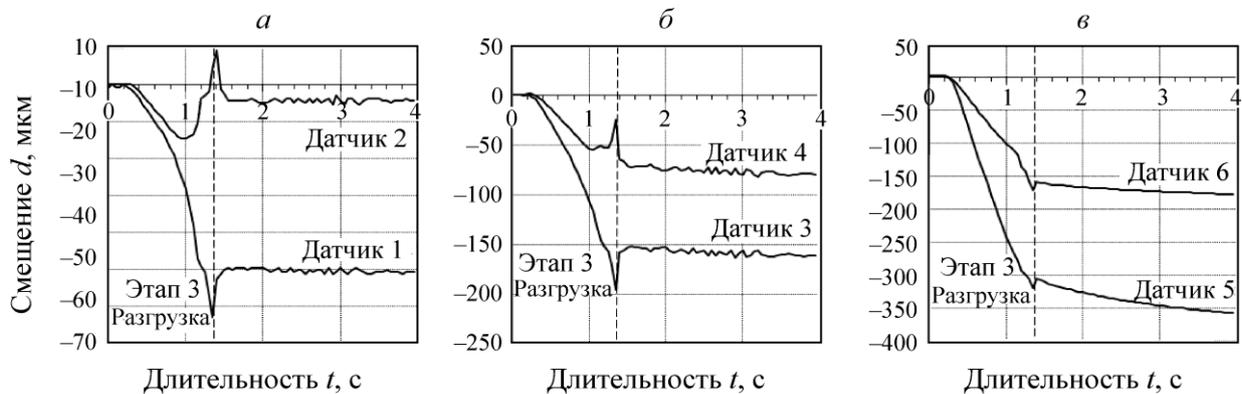


Рис. 3. Графики по показаниям датчиков на этапе 3: *a* — датчики 1, 2; *б* — 3, 4; *в* — 5, 6

На рис. 4 приведены временные фрагменты из записи теплового поля, стрелками показаны точки m_1 , m_2 , в которых регистрировалась температура теплового поля. Температура окружающей среды 22.5 °С. На рис. 4*a* представлен этап 1, время от начала эксперимента 2 мин 30 с, нагрузка составляет около 20 кН. Температура в боковых от отверстия областях модели начинает увеличиваться, в точке m_1 равна 22.8 °С. Эти области принимают на себя основную нагрузку.

На рис. 4*б* — время 6 мин, величина нагрузки 85 кН. Нагружение остановлено. Это максимальное значение нагрузки. Модель до нарушения сплошности не доводится. Максимальные значения температуры в точках m_1 и m_2 , фиксируемые на внутренних боковых поверхностях отверстия, составляют 26.9 и 28.8 °С соответственно. Они соизмеримы с температурой при раз-

рыве сплошности [4], т. е. боковые поверхности отверстия претерпевает наибольшую деформацию. Температура областей над и под отверстием увеличивается незначительно, так как эти области принимают на себя незначительную нагрузку.

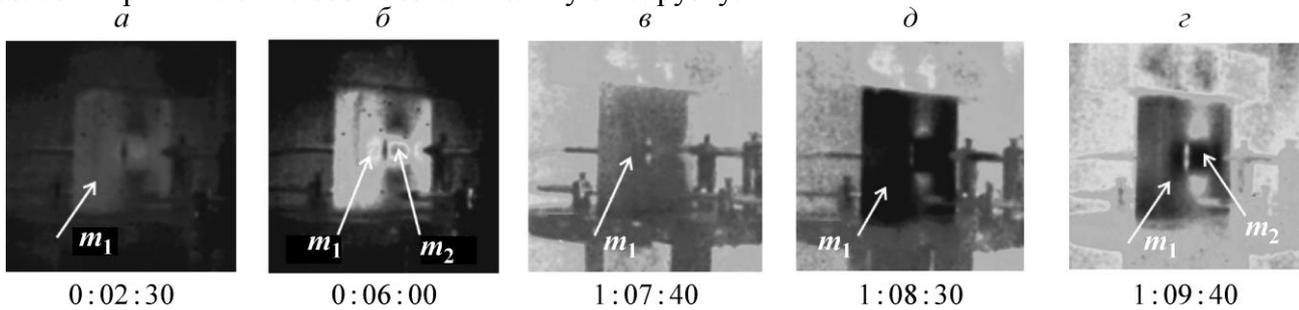


Рис. 4. Виды теплового поля на этапах эксперимента: *а, б* — 1 этап; *в* — 2 этап; *г, д* — 3 этап (под рисунком указано время от начала эксперимента)

На рис. 4*в* представлен этап 2, время 1 ч 7 мин 40 с. Модель остыла. Температура в точке m_1 принимает значение 22.5°C . Нагрузка за счет пластической деформации модели упала до 71.5 кН. На рис. 4*г* показан этап 3, время 1 ч 8 мин 30 с. Выполнена полная разгрузка. Температура модели резко понизилась, в точке m_1 она равна 18.3°C , что значительно меньше температуры окружающей среды 22.5°C . На рис. 4*д* время — 1 ч 9 мин 40 с. Температура модели начинает повышаться и в точках m_1 и m_2 составила 18.6 и 18.5°C соответственно. По истечении около 1 ч тепловое поле модели достигло температуры окружающего воздуха 22.5°C .

ВЫВОДЫ

В результате квазистатической нагрузки на физическую модель в форме параллелепипеда с полостью в виде цилиндрического отверстия в ней формируются четыре зоны: две — по бокам полости, которые воспринимают основную нагрузку, и две — в центральной части сверху и снизу от полости, которые испытывают небольшие нагрузки за счет наличия полости. Высокие значения температуры теплового поля регистрируется на боковых поверхностях отверстия, что указывает на значительные деформации этих участков. При сбросе квазистатической нагрузки температура теплового поля резко падает и становится значительно меньше температуры окружающего воздуха. Затем она повышается и достигает температуры окружающей среды. Таким образом, при резком сбросе нагрузки обратные деформационные процессы предварительно нагруженной модели вызывают понижение температуры теплового поля модели по сравнению с внешней температурой.

Авторы выражают благодарность за помощь при проведении исследований сотруднику ЦКП О. А. Персидской.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wu L., Cui C., Geng N., and Wang J. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, vol. 37, issue 6, pp. 879–888.
2. Rakovskaya E. V. Mathematical modeling of stress, strain and temperature fields in mesh structures made of composite materials under quasi-static loading, *Synopsis of Cand. Tech. Sci.*, Novokuznetsk, Kemerovo state University, 2015 (in Russian) [Равковская Е. В. Математическое моделирование полей напряжений, деформаций и температуры в сетчатых конструкциях из композитных материалов при квазистатическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. — Новокузнецк: КГУ, 2015.]
3. Geng N. G., Yu. P., Deng M. D., et al. The simulated experimental studies on cause of thermal infrared precursor of earthquake, *Acta Geoscientia Sinica*, 1998, vol. 18, pp. 83–88.

4. **Geng N., Cui C. Y., and Deng M. D.** The remote sensing observation in experiments of rock failure and the beginning of remote sensing rock mechanics, *Acta Seismologica Sinica*, 1993, vol. 6, issue 4, pp. 971–980.
5. **Wu L. X., Liu S. J., Wu Y. H., et al.** Remote sensing-rock mechanics (I) – Laws of thermal infrared radiation from fracturing of discontinuous jointed faults and its meanings for tectonic earthquake omens, *Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering*, 2004, issue 1, pp. 24–30.
6. **Wu L. X., Liu S., Wu L., and Wu H.** Changes in infrared radiation with rock deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39, no. 6, pp. 825–831.
7. **Honner M., Litos P., and Svantner M.** Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique, *Infrared Physics & Technology*, 2004, vol. 45, issue 2, pp. 131–142.
8. **Shi Y., Liu S. Q. H., and Wu L.** The time-space relationship between strain, Temperature and Acoustic Emission of Loaded Rock, *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Xi'an, China, 2010 March 22–26*, pp. 114–118.
9. **Vostrikov V. I., Usol'tseva O. M., Tsoi P. A., and Wang K.** Investigation of the geomechanical state of physical models having technological cavities under the action of quasistatic and cyclic load, *International Conference Geo-Siberia-2018, Novosibirsk, 2018, vol. 6*, pp. 300–309 (in Russian) [**Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А., Ван К.** Исследование геомеханического состояния моделей, имеющих технологические полости, при квазистатических и циклических нагрузках // *Международ. конф. Гео-Сибирь-2018. — Новосибирск, 2018. — Т. 6. — С. 300–309.*]