

массив не является абсолютным показателем при определении размеров охранных целиков между шахтными стволами и участками ведения горных работ на больших глубинах. Данное обстоятельство, в совокупности с полученным ранее результатом, указывающим на то, что зона вредного влияния с увеличением глубины ведения горных работ начинает приобретать куполообразную форму, говорит о потенциальной возможности уменьшения протяженности охранных целиков.

Таким образом, в данном исследовании была разработана механико-математическая модель, позволяющая определять НДС упругопластического породного массива по всей его высоте при ведении горных работ большими площадями. Решения представленных модельных задач были получены с помощью модификации метода конечных элементов путем введения блочных упругих элементов в те участки породного массива, в которых наблюдается нарушение его сплошности. Полученные результаты позволяют корректно определять размеры зон вредного влияния горных работ на породный массив, что, в свою очередь, может быть использовано при уточнении размеров охранных целиков под геотехнические объекты.

Список литературы

- 1 Analysis of the surface subsidence induced by mining near-surface thick lead-zinc deposit based on numerical simulation. Processes / Y. Zhao [et al.]. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–22.
- 2 Numerical simulation of surface subsidence and backfill material movement induced by underground mining / X. Li [et al.] // Advances in Civil Engineering. – 2019. – Vol. 815. – P. 1–17.
- 3 Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element methods / Y. Ju [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 113. – P. 191–210.
- 4 **Гюу В.-В.** Relationship between surface subsidence factor and mining depth of strip pillar mining / W.-B. Gou, Q.-L. Hou, Y.-F. Zou // Transactions of Nonferrous Metal Society of China. – 2011. – Vol. 21. – P. 594–598.
- 5 **Пронкевич, С. А.** Модели грунтов и горных пород при конечно элементном моделировании. Теоретическая и прикладная механика / С. А. Пронкевич, М. Ю. Шпургалова. – 2018. – Вып. 33. – С. 185–192.
- 6 **Журавков, М. А.** Моделирование геомеханического состояния породного массива при отработке подземного пространства большими площадями / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климович // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 4. – С. 97–104.
- 7 **Журавков, М. А.** Модифицированный алгоритм МКЭ с введением блочных упругих элементов моделирования геомеханического состояния подработанного породного массива / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 3. – С. 3–12.

УДК 539.3

НАГРУЖЕНИЕ СЭНДВИЧ-ПЛАСТИНЫ НА ОСНОВАНИИ ПАСТЕРНАКА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. Г. КОЗЕЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время широко применяются в транспортном и строительном комплексах сэндвич-пластины. При их создании сочетают компоненты, обладающие различными физическими и/или химическими свойствами. Это позволяет получать относительно легкие элементы конструкций, детали машин и механизмов, обладающие высокими прочностными и жесткостными характеристиками, а также способные противостоять возникающим при эксплуатации негативным воздействиям.

Несмотря на то, что основы теории расчета многослойных конструкций были заложены ещё в прошлом столетии [1], разработка методов расчета, адекватно описывающих поведение сэндвич-пластин под нагрузкой, и сейчас актуальна. Деформирование упругого трехслойного стержня в температурном поле исследовано в статье [2]. Изгиб упругой кольцевой композитной пластины с легким наполнителем, покоящейся на упругом основании модели Винклера, рассмотрен в работе [3]. Сравнительный анализ моделей Винклера и Пастернака на примере трехслойных круговых пластин показал необходимость применения двухпараметрической модели Пастернака для описания реакции основания [4].

В работе рассмотрен изгиб сэндвич-пластины, связанной с упругим основанием, при термосиловом воздействии.

Сэндвич-пластина состоит из трех слоев. Для внешних несущих слоев справедливы гипотезы Кирхгофа. В промежуточном толстом слое (заполнителе) используется гипотеза Тимошенко. Несущие слои воспринимают основную нагрузку, наполнитель удерживает их на определенном расстоянии и обеспечивает совместную работу всего пакета. Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат. За искомые величины приняты: прогиб пластины, относительный сдвиг в наполнителе, радиальное перемещение координатной плоскости. Связь реакции основания и прогиба принимается согласно модели Пастернака.

Деформирование сэндвич-пластины может происходить как под действием силовой осесимметричной нагрузки, так и стационарного температурного поля. Распределение температуры по толщине трехслойного пакета считается известным [5], изменение упругих характеристик материалов несущих слоев принимается в соответствии с формулой Белла [6]. Получена система дифференциальных уравнений равновесия и её решение, а также проведен численный параметрический анализ зависимости напряженно-деформированного состояния трехслойного пакета от температурного и силового воздействий, параметров сжатия и сдвига основания.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T22M-072).

Список литературы

- 1 Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. – М. : Машиностроение, 1980. – 375 с.
- 2 Старовойтов, Э. И. Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.
- 3 Старовойтов, Э. И. Деформирование локальными нагрузками композитной пластины на упругом основании / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, М. Сулейман // Механика композитных материалов. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 109–120.
- 4 Козел, А. Г. Сравнение решений задач изгиба трехслойных пластин на основаниях Винклера и Пастернака / А. Г. Козел // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 1 (54). – С. 30–37.
- 5 Козел, А. Г. Термоупругий изгиб круговой трехслойной пластины, связанной с основанием Пастернака / А. Г. Козел // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 31–37.
- 6 Белл, Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых тел : в 2 ч. / Дж. Ф. Белл. – М. : Наука, 1984. – 1027 с.

УДК 536.24

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. А. КОЛЕСНИК, А. С. НОВИКОВ, Н. А. ТУШАВИН
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Для увеличения мощности перспективных двигателей необходимо увеличивать температуру и давление рабочего тела, что входит в противоречие с жесткими требованиями по прочности элементов конструкций, таких как камеры сгорания, лопатки турбин и др. Для охлаждения таких элементов конструкций применяются различные системы охлаждения воздухом, отбираемым от компрессора: конвективное охлаждение внутренних поверхностей, не соприкасающихся с высокотемпературным газовым потоком; пористое охлаждение; охлаждение вдувом через организованные перфорации и т. п. При проектировании различных систем охлаждения остро встает вопрос эффективности охлаждения при компромиссном удовлетворении различных характеристик систем охлаждения: максимального теплосъема охладителем при минимальном его расходе и минимальных гидравлических потерях давления, а также минимальных потерях импульса газодинамического потока при вдуве в него охладителя и, следовательно, минимальных потерях прочности.

В последнее время появилось направление разработки систем охлаждения на основе составных проницаемых оболочек (СПО), представляющих собой многослойную конструкцию с большим количеством каналов для прохождения охладителя (воздуха) и каналов для вдува охладителя в высо-