

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ХРУПКОГО ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ МНОГООСЕВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Заболотский А.В., Хадыев В.Т., Турчин М.Ю., Мигашкин А.О.

ООО «Группа «Магнезит, Сатка»

К хрупким пористым материалам относятся керамические конструкционные материалы, широко применяемые в строительстве и промышленности. Данный класс материалов включает в себя строительные материалы (кирпичи, бетон) и материалы для специального применения, например, огнеупоры, применяемые в качестве ограждения высокотемпературных сред в металлургии, стекольной и цементной промышленности и других отраслях.

Согласно действующим российским стандартам аттестация прочностных характеристик таких материалов осуществляется путем разрушения их образцов под действием одноосевой сжимающей или изгибающей нагрузки, что является достаточным для сравнения разных материалов и вывода об их соответствии стандартным условиям применения. Однако, фактически конструкционные материалы практически никогда не эксплуатируются в условиях нагружения, аналогичных условиям прочностных испытаний. Например, огнеупоры в футеровке оборудования вследствие собственного теплового расширения и весового воздействия соседних элементов конструкций находятся в стесненных условиях [1] и испытывают, как минимум, двухосевую нагрузку (при предварительном нагреве) и всестороннее неравномерное сжатие при термообработке рабочего тела.

С учетом того, что описываемые материалы являются гетерофазными, содержащими структурные дефекты мезоскопического размера и состоящими из матрицы, зерен заполнителя и пустот (пор и микротрещин), их разрушение носит, как правило, усталостный характер и начинается с возникновения трещин на дефектах элементов структуры. Поры (микротрещины) и зерна заполнителя выступают как концентраторы напряжений, что приводит к локальному превышению предела прочности матрицы вблизи этих структур и формированию зародышевых трещин. Кроме того, на границах матрицы и зерен заполнителя могут наблюдаться локальные флуктуации свойств материала, вызванные как термическими эффектами, вследствие различия в коэффициентах температурного расширения фаз, так и особенностями взаимной адгезии зерен и матрицы [2]. В дальнейшем, под действием механических и термомеханических нагрузок, микротрещины образуют сеть дефектов, распределенную между зернами заполнителя, которая при достижении критического уровня механических напряжений может приводить к появлению и внезапному росту катастрофической трещины [3].

Существующая в реальности схема нагружения материалов в процессе эксплуатации требует своего учета при выполнении прочностных расчетов конструкций как для определения влияния многоосности нагрузок на результирующее напряженно-деформированное состояние конструкции, так и изменения не только числового значения напряжений на концентраторах при многоосной нагрузке, но и самой картины распределения локальных максимумов и минимумов напряжений (по сравнению с одноосевым нагружением). Расчетным путем установлено, что общий вид поля напряжений и численные значения параметров напряженно-деформированного состояния материала различны при изменении количества осей приложения нагрузки. Практическая значимость данного фактора была выявлена авторами, например, при выполнении расчетов для обоснования режимов сушки огнеупорных бетонов [4]: в этом случае, при отсутствии учета стесненных условий термообработки изделия, расчет приводил к кратному завышению требуемого времени экспозиции и значительному занижению допустимой скорости разогрева изделия по сравнению с безопасными режимами, разработанными на основании экспериментальных

данных.

Ввиду того, что эксплуатация огнеупорных материалов происходит в условиях, при которых невозможны непосредственное наблюдение и измерения параметров службы, актуально применение математического моделирования разрушения материалов, особенно на мезоскопическом уровне структуры материалов (затрагивающем связующую матрицу, зерна заполнителя и микродефекты текстуры). В частности, Группа Магнезит в настоящее время разрабатывает математическую модель, позволяющую связать результаты лабораторной аттестации огнеупорных материалов с локальными разрушающими нагрузками, возникающими в службе, в том числе при реализации широко распространенных стесненных условий и под действием термических и других многоосных нагрузок. Разрабатываемая модель позволит повысить эффективность анализа устойчивости конструкций на стадии проектирования футеровок и снизить количество термомеханических повреждений огнеупорных изделий на начальных этапах эксплуатации различных термических агрегатов.

1. Астафуров С.В., Шилько Е.В., Псахье С.Г. Влияние стесненных условий на характер деформирования и разрушения блочных сред при сдвиговом нагружении // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 6. С. 23–32.
2. Grigoriev A.S., Zabolotskiy A.V., Shilko E.V., Dmitriev A.I., Andreev K.P. Analysis of the quasi-static and dynamic fracture of the silica refractory using the mesoscale discrete element modeling // Materials. 2021. V. 14. P. 7376.
3. Заболотский А.В., Борзов А.Н., Хадыев В.Т., Андреев К.П. Цифровизация промышленных тепловых процессов и агрегатов // Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 1. С. 209–214.
4. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Марченко Д.А. Моделирование процесса перемещения влаги в огнеупорном бетоне при сушке с помощью перколяционных структур // Новые огнеупоры. 2018. № 8. С. 28–35.