

Академик Ю. Н. РАБОТНОВ, В. Н. БАРАБАНОВ, Г. М. ВОЛКОВ,
Л. И. КНОРОЗ

ЛОКАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Повышение прочности углеграфитовых материалов (у.г.м.) с увеличением температуры испытания не имеет удовлетворительного теоретического объяснения и экспериментального подтверждения существующих гипотез. Если относительно небольшое (на 20—30%) повышение прочности при повышении температуры до 2000°С можно объяснить снятием внутренних напряжений, возникших в процессе охлаждения у.г.м. от температур графитации до нормальной температуры, то резкое (в 2—3 раза) увеличение прочности у.г.м. при температурах 2500—3000° требует более детального изучения и анализа механизма проявления и протекания пластической деформации, снижающей концентрацию напряжений около существующих исходных макро- и микродефектов (трещин, пор и т.п.). Для этого и была поставлена данная работа.

Углеграфитовые материалы состоят из разнодисперсных зерен наполнителя, скрепленных одно с другим мостиками из коксового остатка связующего. Отдельные участки материала существенно различаются по количеству и характеру ориентации пор, зерен, а также макро- и микротрещин, образующихся в процессе его изготовления. Неоднородность дисперсной структуры материала предопределяет формирование неоднородности местной концентрации напряжений при внешнем нагружении, что должно проявляться в характере его деформирования и разрушения. Однако деформирование и разрушение у.г.м. при нормальной температуре из-за хрупкого характера разрушения не позволяет выявить особенности процесса, обусловленные специфической дисперсной структурой материала столь четко, как деформирование в области высоких температур (2500—3200°), когда пластичность графита увеличивается на 2—3 порядка, а предельные деформации достигают 10—40%.

Процесс высокотемпературного деформирования и разрушения у.г.м. изучали методом фрактографического анализа с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов на образцах, деформированных при высоких температурах до заданных величин общих и остаточных деформаций вплоть до разрушения при скорости перемещения активного захвата 2 мм/мин.

1. Характерной особенностью деформирования у.г.м. в области температур $\geq 2500^\circ$ является развитие существовавших до нагружения технологических трещин на поверхности и в объеме материала. Предельная величина раскрытия трещин увеличивается с повышением температуры испытания и достигает 1 мм и более при 2800—3200°, что связано с проявлением пластичности графита в условиях испытаний с низкой скоростью деформирования. Степень раскрытия трещины зависит от ее ориентации относительно направления действующей нагрузки: она возрастает при увеличении угла между главной осью трещины и направлением действующей нагрузки, достигая максимального значения при 90°. Рост данной трещины замедляется или прекращается в результате выхода ее в пору или объединения с другой трещиной. Развитие трещины ограничивается также ориентацией и формой соседних зерен наполнителя.

2. В процессе высокотемпературного деформирования у.г.м. становится очевидным влияние структурной неоднородности материала. Крайне неравномерное распределение напряжений как в разных сечениях рабочей части образца, так и в плоскости одного сечения приводит к резко выраженной неравномерности деформирования рабочего объема образца

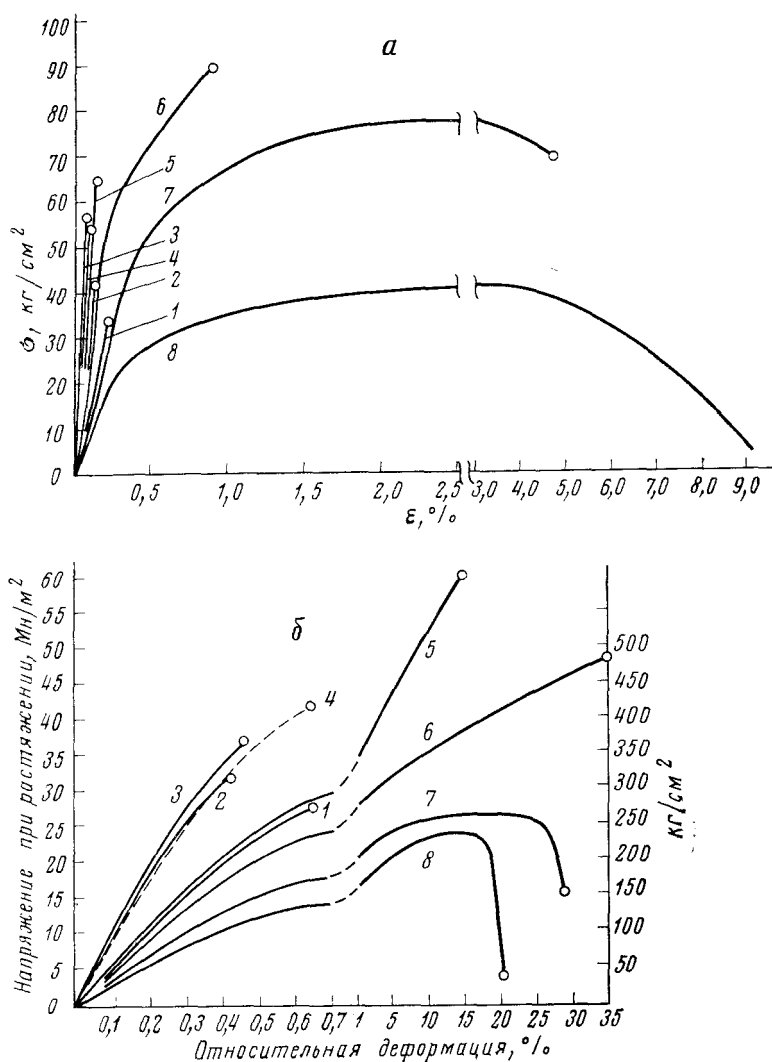


Рис. 2. Диаграммы напряжение — деформация при растяжении графитов марок ЭГ-0 (а) и МПГ (б) при различной температуре (°C): 1 — 20; 2 — 1000; 3 — 1500; 4 — 2000; 5 — 2500; 6 — 2800; 7 — 3000; 8 — 3200

(рис. 1а). В зонах повышенной концентрации напряжений происходит существенно более интенсивное раскрытие трещин.

3. Наиболее примечательной особенностью процесса высокотемпературной деформации у.г.м. является формирование волокнистых образований, прочно скрепленных с расходящимися берегами трещины (рис. 1б). Часть волокнистых образований при деформировании высокой степени оказывается разорванной, причем, часто с образованием шейки в месте разрыва (рис. 1в), другие остаются целыми. Волокнистые образования ориентированы строго в направлении деформирования. Очевидно, что они формируются в результате пластического вытягивания перемычек между берегами трещин (рис. 1б, з). Очевидно также, что в формировании волокнистых

образований участвует преимущественно графитированный коксовый остаток связующего, а не наполнителя. Об этом свидетельствует выявление контура зерен наполнителя на механически обработанной поверхности образца в результате его высокотемпературного растяжения (рис. 1а).

Морфология волокнистых образований предопределяется характером контактных зон между берегами исходных трещин и пор. Некоторые образования имеют округлую форму в поперечном сечении, длину до 1 мм и более, другие напоминают пластины. В широко раскрытых трещинах они хорошо видны визуально, но особенно четко их можно наблюдать при помощи микроскопа с большой глубиной резкости. Принимая величину максимального раскрытия трещин до нагружения, равной 0,3 мм, можно вычислить, что волокнистые образования удлиняются на 100–300%, тогда как средняя деформация всей рабочей части образца достигает лишь 7–15%.

С увеличением температуры интенсивность локальной деформации у.г.м. возрастает.

Интенсивность волокнообразования зависит также от вида у.г.м. Наибольшее количество волокнистых образований отмечено на образцах графита марки ЭГ-0.

Можно предположить, что волокнистые образования выполняют роль прочных стяжек между расходящимися берегами трещин. Вытягивание и соответствующее упрочнение волокнистых образований, наряду с указанными выше причинами, может приводить к прекращению развития данной трещины и локализации процесса деформирования на другой трещине. Поэтому деформирование и развитие трещины в процессах высокотемпературного нагружения у.г.м. происходит попеременно, с преимущественным развитием то одной, то другой трещины.

4. Отмеченные особенности процесса высокотемпературного деформирования у.г.м. приводят к соответствующему изменению характера зависимости $\sigma(\epsilon)$ (рис. 2). Несмотря на наличие ниспадающей ветви диаграммы, шейка в рабочей части образца, характерная для пластически деформируемых металлов, не образуется. В данном случае эквивалентом шейки является соответствующее уменьшение живого сечения образца в результате роста имевшихся в нем трещин и последовательного разрыва волокнистых образований, аналогично характеру разрыва пучка волокон (рис. 2 см. вкл. к стр. 1055).

Любопытно отметить, что у.г.м., отличающиеся условиями контактного взаимодействия частиц наполнителя, отличаются и характером высокотемпературной зависимости $\sigma(\epsilon)$. Как видно из рис. 2б, графит марки МПГ разрушается при удлинении, значительно большем, чем ЭГ-0. С одной стороны, это может быть объяснено тем, что у мелкозернистого графита МПГ (максимальный размер зерен наполнителя графитов ЭГ-0 и МПГ составляет соответственно около 3,0 и 0,15 мм) объемная доля пластичного коксового остатка больше. С другой стороны, из-за самоспекания зерен наполнителя у этого материала меньше протяженность границ зерен и больше препятствий, тормозящих распространение трещин. Поэтому до нарушения межзеренных связей тело зерна имеет возможность деформироваться в большей степени.

Поступило
9 VI 1975

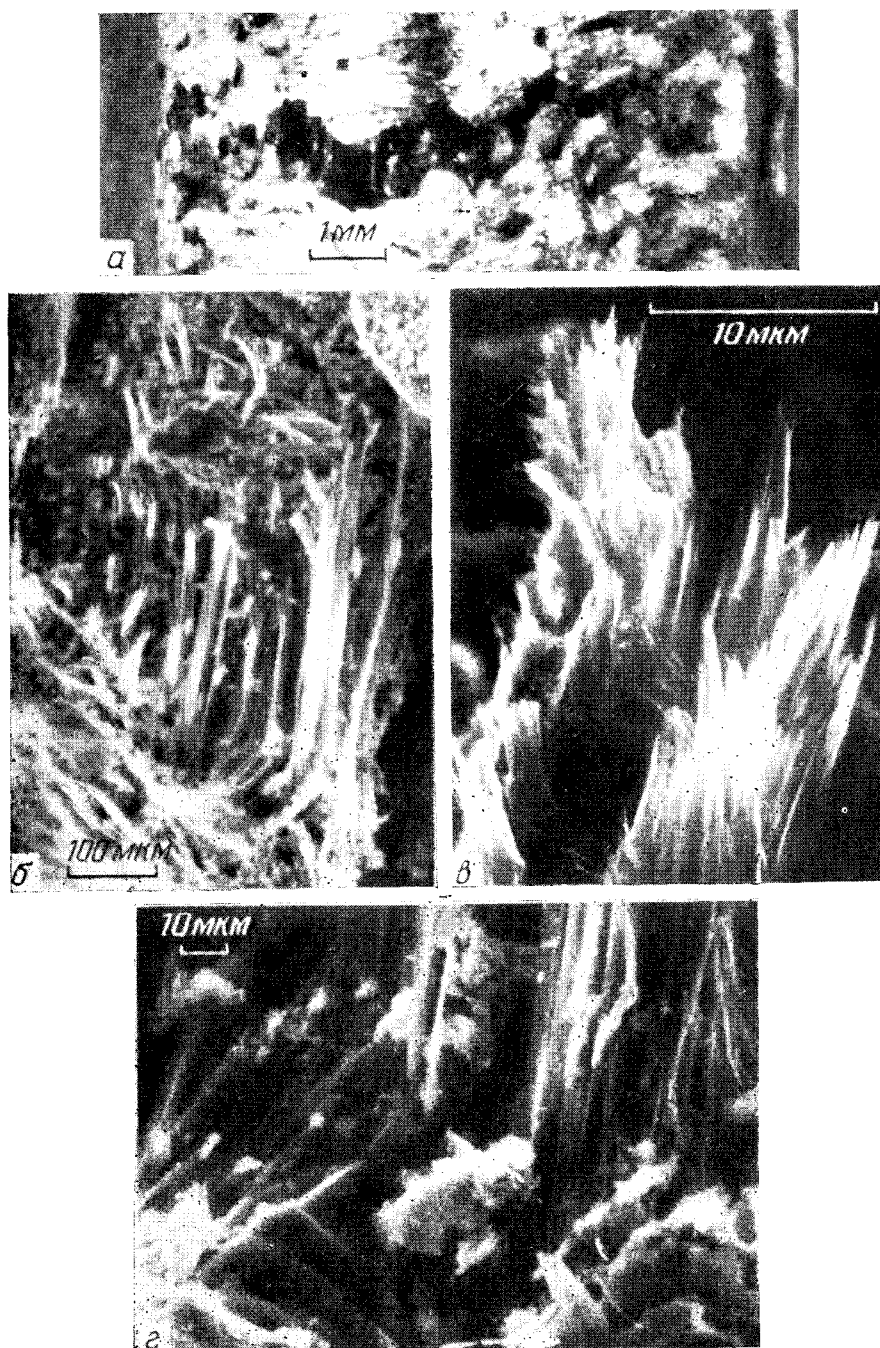


Рис. 1. Фрактограммы графита марки ЭГ-0, подвергнутого растяжению при температуре 3200°