Г.Е.ФРЕГЕР
Восточно-Украинский университет, Донецк, Украина
В.П.ТАЦИЕНКО, В.М.БУЧАТСКИЙ
ОАО «Кузбассуголь», Кемерово, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ГИБРИДНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Прочностные характеристики композитов на основе спирально армированных наполнителей, используемых в горной промышленности, практически при всех видах нагружения имеют более высокие значения прочности, чем однонаправленные пластики. Если повышение прочности материала со спирально армированным наполнителем в трансверсальных направлениях и при сдвиге теоретически обосновано, то характеристики в направлении основного армирования должны иметь более низкие значения в связи с уменьшением содержания основной арматуры в материале. В то же время влияние обмоточного слоя на прочностные характеристики армированного пластика начинает сказываться уже на стадии получения спирально армированных элементов. Наличие обмотки способствует не только повышению технологичности переработки арматуры, но и более полной реализации ее прочности в материале. Положительный эффект при этом достигается за счет выпрямления элементарных волокон, уплотнения и обжатия жгута арматуры, что способствует одновременному включению их в работу при нагружении.

При получении спирально армированных наполнителей под действием момента, создаваемого усилием натяжения обмоточной нити, основная арматура закручивается на некоторый угол. Абсолютная величина его зависит от расположения волокон относительно центра жгута и для наружного слоя находится обычно в пределах 1-5°. При таких углах закручивания прочностные характеристики композиционных материалов растут за счет эффекта кабельной структуры армирующих жгутов.

Анализ процессов трещинообразования и разрушения в композитах указывает на положительное влияние увеличения диаметра армирующих волокон, приводящего к увеличению усилия выдергивания их из структуры материала. Однако увеличение диаметра волокон существенно снижает технологичность их переработки и прочность. Компромиссное решение заключается в группировке волокон в пучки, которые обладают достаточной гибкостью при переработке, а при разрушении ведут себя по некоторым показателям, как отдельные волокна. В проведенных исследованиях трещиностойкость композитов увеличивалась при помощи пучков волокон и могла меняться путем изменения механических свойств межфазной поверхности пучок – матрица. Пучки волокон разрывались в плоскости трещины. Установлено, что перераспределение напряжений в волокнах при переходе к такому виду разрушения приблизительно на порядок эффективнее выдергивания.

В материалах со спирально армированным наполнителем за счет введения вспомогательной арматуры реализуется пучковый характер структуры композита с возможностью вариации механических характеристик границы раздела пучков. При испытаниях на растяжение в направлении укладки основной арматуры материалы со спирально армированным наполнителем, в которых обеспечены условия хорошей связи на границе раздела пучков волокон основной арматуры (диаметр элемента 0,7 мм), сохраняют несущую способность до определенных значений концентрации разрушенных волокон на коротком участке и разрушаются без расслоения (рис.1, *а*). Анализ поверхности разрушения также показал, что количество выдернутых волокон существенно снижается, длина их составляет 20-25 мкм, а разрушение основной массы волокон происходит в плоскости развития трещины. В отличие от этого разрушение однонаправленных материалов происходит в результате накопления повреждений в наиболее слабых или дефектных участках образца с последующим распространением трещин по границам раздела волокон в продольном направлении и сопровождается выдергиванием отдельных волокон,

групп или пучков волокон из структуры материала. Различия в характере разрушения образцов со сплошными и зацепляющими обмотками основной арматуры можно видеть при сопоставлении рис.1, *а* и 1, *в*. При малых размерах спирально армированного элемента (0,7 мм) и сплошной обмотке вследствие более низкой сдвиговой прочности, по сравнению с зацепляющимися элементами, происходит накопление повреждений на более протяженном участке образца, что приводит к разрушению с разрывом отдельных элементов на разных участках и последующим выдергиванием их из структуры. При увеличении геометрических размеров спирально армированных элементов (до 1,6 мм) пучки волокон становятся достаточно большими для реализации механизма разрушения, характерного для однонаправленного материала. При этом сдвиговый характер разрушения наблюдается как внутри элемента, так и по границам контакта основной и вспомогательной арматур (рис.1, *г*). Указанные эффекты позволяют повысить коэффициент использования прочности исходной арматуры в направлении армирования.

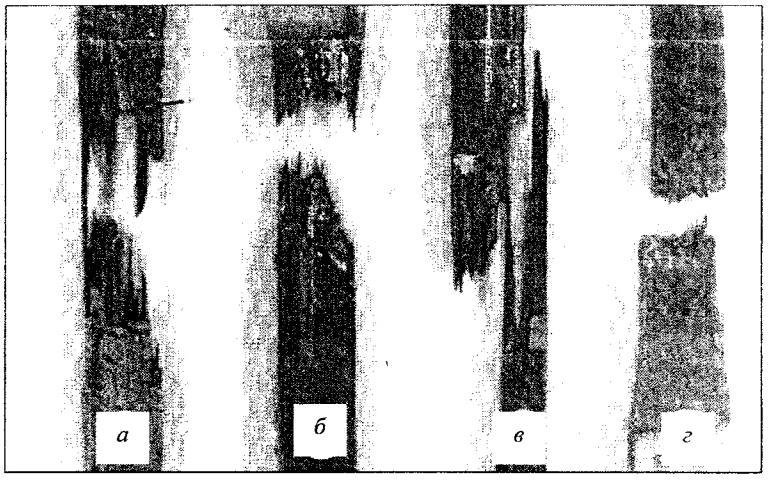


Рис.1. Виды разрушения образцов при испытаниях на растяжение в направлении укладки основной арматуры

При трансверсальном сжатии начальные трещины начинают образовываться в наиболее слабом по сдвиговой прочности участке материала со спирально армированным наполнителем – в элементе основной арматуры. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к развитию магистральной трещины, которая может проходить как через тело элемента основной арматуры, так и по поверхности контакта ядра и обмоточной нити или соседних элементов (рис.2). При сжатии в трансверсальном направлении материал обмоточной нити активно участвует в обеспечении несущей способности элементов. Поскольку волокна обмотки расположены под углом и не совпадают с поверхностью развивающейся трещины, угол разрушения образцов композитов со спирально армированным наполнителем при трансверсальном сжатии отличен от обычного для однонаправленных материалов (около 30°) и в зависимости от шага обмотки, ее процентного содержания, формы и геометрических размеров элементов изменяется в пределах 35-45°. Такие значения угла разрушения более характерны для пространственно армированных материалов. Величина его для трехмерно армированных композитов составляет примерно 45°.

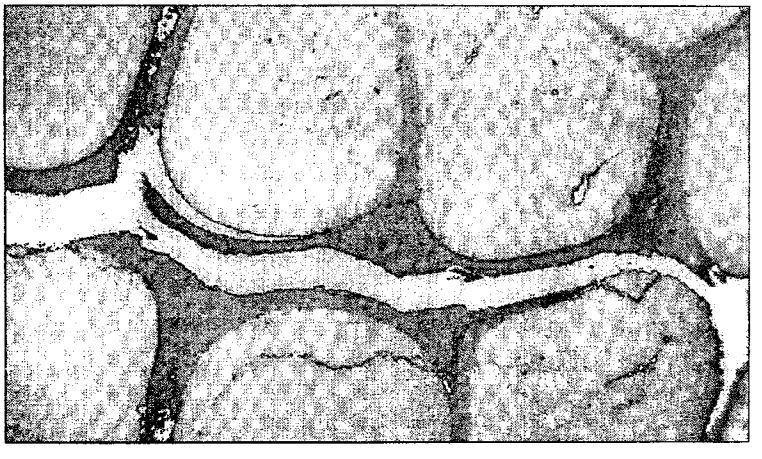


Рис.2. Развитие трещины в структуре композита при трансверсальном сжатии (увеличение в 50 раз)

При трансверсальном растяжении обмоточный слой оказывает также демпфирующее влияние на распределение напряжения между матрицей и спирально армированными элементами. В этом случае нагрузка к ядру элемента передается через матрицу и обмоточный слой, которые воспринимают на себя большую часть нагрузки и, естественно, оказываются в более жестких условиях. В связи с этим разрушение происходит, как пра-

вило, в межэлементной зоне. Характер разрушения композитов при поперечном сдвиге близок к разрушению при трансверсальном растяжении: разрушение происходит по границе контакта обмоточных слоев, слоя и ядра основной арматуры. В этом случае обеспечивается частичное включение вспомогательной арматуры в работу против действующих сил.

Таким образом, анализ процессов разрушения композитов на основе спирально армированных наполнителей при различных видах нагружения показывает, что введение вспомогательной арматуры приводит к перераспределению микронапряжений в структуре материала и, следовательно, к изменению характера разрушения материала. Изменяя основные структурные параметры и физико-механические свойства компонентов материала, можно оптимизировать его состав и добиться повышения необходимых упругих и прочностных свойств композитов при определенных видах нагружения.