

Композиционные материалы и возможность их применения в аппаратах профессора Г.А. Илизарова

А.Н. Пугачёв, В.Г. Наумов, Н.Н. Взятыхшев¹, А.Н. Ширяев, М.В. Тихомирова²

Composition materials and the possibility of their use in the Ilizarov fixators

A.N. Pougachiov, V.G. Naumov, N.N. Vziatyshev¹, M.V. Tikhomirova²

Закрытое акционерное общество Научно-производственное предприятие «КОМПОМЕД», г. Королёв Московской области
(генеральный директор – А. Н. Пугачёв)¹,
Общество с ограниченной ответственностью «Фирма «Раноконм», г. Мытищи Московской области (директор - А. Н. Ширяев)²

Современные требования к качеству аппаратов внешней фиксации (прочность, рентгенопрозрачность, малый вес) могут обеспечить высокомодульные высокопрочные композиционные материалы: органопластики и углепластики. Прочность полукольца аппарата Г.А. Илизарова в пределах 2,2-2,3 кН получена ЗАО НПП «КОМПОМЕД» при применении углепластика в составе: ткань УТ-900-2,5 и эпоксидное связующее.
Ключевые слова: углепластик, прочность, полимеры, остеосинтез.

Up-to-date standards of the quality of external fixators (strength, roentgenolucency, small weight) can be provided by high-modular composition materials of high strength: organoplastics and carbon fiber reinforced plastics. The strength of the Ilizarov fixator half-ring within 2,2-2,3 kN was obtained by closed joint-stock company, scientific-and-production enterprise "Compomed" using the carbon fiber reinforced plastic consisting of UT-900-2,5 tissue and epoxide binder.
Keywords: carbon fiber reinforced plastic, strength, polymers, osteosynthesis.

За 50 лет клинического применения конструкция аппаратов внешней фиксации Г.А. Илизарова получила широкое развитие. Однако материалы, применяемые для их изготовления, мало чем отличаются от первых образцов. Это конструкционные стали.

Сегодняшняя практика лечения переломов и реконструкции конечностей требует значительно-го снижения веса аппаратов и его рентгенопрозрачности с сохранением, как минимум, упруго-прочностных свойств и хемостойкости. Подобным комплексом свойств обладают современные полимерные композиционные материалы.

Композиционные материалы используют на практике уже длительное время.

Они разрабатывались в большинстве случаев для улучшения прочности, жаропрочности и ряда других специфических свойств. Специфические требования к свойствам возникли в связи с развитием ракетостроения, космической техники, специального машиностроения и т. п. Например, космический аппарат должен быть изготовлен из материалов, одновременно лёгких, жёстких, достаточно прочных, способных противостоять большим аэродинамическим нагрузкам. Материалы обшивки должны сохранять свою прочность при температуре свыше 1000°C.

Рядом уникальных свойств обладают компо-

зиционные материалы, армированные специальными волокнами: стеклянными, углеродными и органическими. Появление таких волокнистых синтетических материалов, как высокопрочные углеродные волокна, монокристалльные волокна и, особенно, сверхпрочные органические волокна позволило создавать поистине универсальные композиты, позволяющие эксплуатировать их в любых экстремальных условиях.

Развитие химической промышленности, конверсия позволяют сегодня предложить эти, экзотические ещё недавно, материалы для использования в народном хозяйстве России и, в первую очередь, в важнейшей области деятельности человека – в медицине. Особенно в тех её отраслях, где к эксплуатации медицинского изделия предъявляются специфические требования. В частности, только композиционные материалы могут обеспечить современные требования к качеству аппаратов проф. Г. А. Илизарова.

1. Требования к материалам компонентов аппаратов внешней фиксации Г.А. Илизарова.

Наибольшую трудность представляет замена металлов на полимерные материалы в компонентах аппаратов внешней фиксации костных фрагментов именно кольцевого типа. В то же время, кольца и полукольца аппарата Илизарова – это основные компоненты, которые необхо-

можно значительно облегчить и придать им свойство рентгенопрозрачности, что невозможно при использовании металлов.

Кольцевые компоненты аппарата эксплуатируются в условиях постоянной, весьма значительной нагрузки. Спицы аппарата, фиксирующие костные фрагменты, крепят на полукольцах (или кольцах) аппарата под натяжением до 120 кгс (1,1 кН) каждая (рис. 1) [1]. Таких спиц на одно полукольцо приходится не менее двух.

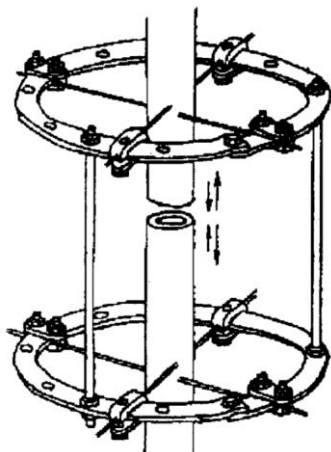


Рис. 1. Схема крепления аппарата Г. А. Илизарова для продольного перемещения дистальной опоры аппарата вместе с костным фрагментом [1, с. 41]

При этом полукольца (или кольца) деформируются и эти деформации необходимо учитывать [2]. Они не должны превышать допустимых величин. Описание линейных перемещений [2] оценивает возможную деформацию кольца в 8-9%.

Наш ориентировочный расчёт показывает, что напряжения, возникающие в материале полукольца, очень велики. Они значительно сужают круг материалов, из которых полукольцо (или кольцо) может быть изготовлено.

Нагрузка действует на концы полукольца и ориентирована в его плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка 2.

Радиус кривизны нейтральной линии – n :
 $n = b / \ln(R/r) = 19 / \ln(67/48) = 19 / 0,334 = 56,89$ мм.

Сечение выше нейтральной линии (с точкой А) – область растяжения, ниже (с точкой В) – область сжатия.

$$e = \rho - n = 57,5 - 56,89 = 0,61 \text{ мм.}$$

Площадь сечения:

$$S = b \cdot h - d \cdot h = 19 \cdot 6 - 7 \cdot 6 = 72 \text{ мм}^2;$$

$$Se = 72 \cdot 0,61 = 43,92 \text{ мм}^3.$$

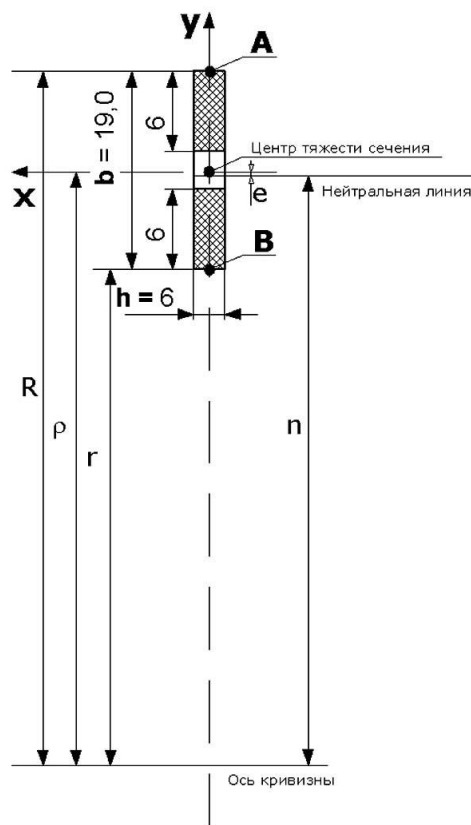
Момент силы Р:

$$M = P \cdot \rho = 200 \cdot 57,5 = 11\,500 \text{ кгс} \cdot \text{мм.}$$

Момент инерции сечения:

$$J = (b^3 h / 12) - (d^3 h / 12) = h(b^3 - d^3) / 12 =$$

$$= 6(6859 - 343) / 12 = 3258 \text{ мм}^4.$$



А – максимально нагруженная точка сечения;
 В – минимально нагруженная точка сечения;
 $d = 7$ мм – диаметр отверстия;
 $R = 67$ мм – внешний радиус полукольца;
 $r = 48$ мм – внутренний радиус полукольца;
 $\rho = 57,5$ мм – радиус центра тяжести сечения;
 Сжимающая нагрузка: $P = 200$ кгс – по оси кривизны, в координатной плоскости Y-Z;

Рис. 2. Геометрические характеристики наиболее нагруженного сечения полукольца аппарата Илизарова

$$\sigma_{\max} (\text{растяг.}) = MR/J = (11\,500 \cdot 67) / 3258 =$$

$$= 236,5 \text{ кгс/мм}^2 = \mathbf{2,319 \text{ ГПа}};$$

$$\sigma_{\max} (\text{сжим.}) = Mr/J = -(11\,500 \cdot 48) / 3258 =$$

$$= -169,429 \text{ кгс/мм}^2 = \mathbf{-1,66 \text{ ГПа}};$$

$$\sigma_{\text{ср}} = P/S_1 = -(200 / 114) = -1,75 \text{ кгс/мм}^2 =$$

$$= \mathbf{-17,16 \text{ МПа}}, \quad S_1 = b \cdot h;$$

$$\sigma_{\max} = 3 \sigma_{\text{ср}} = -(3 \cdot 17,16) = -51,48 \text{ МПа},$$

$$3 = k (\text{коэффициент концентрации});$$

$$\sigma_{\max} (\text{растяг.}) = 2319 - 51,48 = 2267,52 \text{ МПа} =$$

$$= \mathbf{2,27 \text{ ГПа}};$$

$$\sigma_{\max} (\text{сжим.}) = -1662 - 51,48 = -1713,48 \text{ МПа} =$$

$$= \mathbf{-1,71 \text{ ГПа}}.$$

Расчёт произведён для полукольца с минимальным средним радиусом. При использовании полуколец с большими радиусами напряжения в материале значительно увеличатся.

Важным условием успешной эксплуатации изделия под нагрузкой является стабильность его размеров. Ползучесть полимерного материала тем больше, чем ближе эксплуатационная нагрузка приближается к критической – нагрузке разрушения. Для высокопрочных высокомодуль-

ных материалов необходимо, чтобы постоянные нагрузки не превышали 50-70% от разрывной. Поэтому прочность материала полукольца аппарата проф. Г. А. Илизарова должна быть:

$$\sigma_{\max} (\text{растяг.}) = 5,0 \text{ ГПа и}$$

$$\sigma_{\max} (\text{сжим.}) = 4,0 \text{ ГПа.}$$

Применение менее прочных материалов возможно, но на более короткий срок эксплуатации.

Материал полукольца должен быть стойким к дезинфекции – к обработке в формалине при повышенной температуре.

Условие рентгенопрозрачности должно сопровождаться стойкостью материала к излучениям.

2. Структура композиционных материалов.

Сохранение прочности волокон при нагружении – основное условие получения качественных композиционных материалов, так как именно волокна являются основным, несущим нагрузку элементом материала. Простой пучок волокон имеет относительно низкую прочность [2]. Чтобы максимально использовать прочность волокон их необходимо поместить в другой материал – матрицу. Матрица играет роль адгезива, соединяющего волокна в единое целое и придающего композиту монолитность. Прочность и жёсткость композита определяется, главным образом, свойствами армирующего наполнителя – волокнами, однако матрица также вносит достаточно существенный вклад в его свойства. Например, механические свойства композита зависят не только от прочности волокон, но и от синергизма свойств волокон и матрицы. Если пучок волокон нагрузить до величин, близких к предельным в отсутствии матрицы, то начнут обрываться отдельные, имеющиеся всегда в реальных материалах, ослабленные по каким-либо причинам волокна. При этом нагрузка будет распределяться на оставшиеся волокна. Суммарная прочность пучка, естественно, снизится. Если же волокна находятся в матрице, то разрыв отдельных волокон не приведёт к тому, что они перестанут нести какую-либо нагрузку. Причина этого заключается в том, что упругая деформация матрицы вызывает, за счёт адгезии матрицы и волокон, перераспределение напряжения на разорванные волокна, которые, таким образом, продолжают вносить вклад в сопротивление композита нагрузке.

Свойства композита определяются не только типом матрицы и армирующего волокна, но и геометрией армирования. Достаточно широко применяют более экономичные композиты, армированные короткими волокнами. Однако поскольку нагрузка от матрицы на армирующие волокна передаётся сдвиговыми силами, действующими на поверхность волокна, площадь последней должна быть как можно больше площади его сечения. Это делает композиты, армированные длинными волокнами, более эффективными по сравнению с композитами, армированными короткими волок-

нами, особенно в случае необходимости сопротивления максимальным нагрузкам.

3. Номенклатура полимерных композиционных материалов.

Основной особенностью полимерных композиционных материалов является вид армирующего волокна. Наиболее распространёнными в технике являются композиционные материалы на основе высокопрочных высокомодульных стеклянных, органических и углеродных волокон.

3.1. Композиционные материалы на основе высокопрочных высокомодульных органических линейных полимеров.

На основе органических линейных ароматических или алифатических полимеров получен ряд волокон, позволивших создать композиционные материалы нового поколения. К таким волокнам относятся арамидные волокна семейства «кевлар» (Du Pont, США), «тварон» (AKZO, Нидерланды), «технора» (Teijin, Япония) и их различные модификации. В России разработаны волокна «терлон», СВМ, «вниивлон», «армос» и их модификации. Потребность в этих волокнах в 1991 г. составила 24 000 тонн. Свойства некоторых волокон приведены в таблице 1.

В нашей стране сегодня самый большой промышленный выпуск волокна СВМ (ГОСТ 28007-88 – нити и жгут высокомодульные технические) и ткани из этих нитей (ГОСТ 18215-77А – ткань полимерная для конвейерных лент), что очень важно, так как выпуск ее – серьёзная техническая проблема.

Есть опыт изготовления органопластиков из нитей СВМ, хотя каждое изделие – практически эксклюзивная разработка.

Арамиды типа «кевлар», «тварон», «СВМ», «терлон» обладают высокой стабильностью размеров под действием нагрузок, приближаясь по этому показателю к металлическим и стеклянным волокнам [2, с. 94].

При нагревании волокон СВМ и «армос» до 200 °С в течение 1000 часов их прочность и модуль упругости снижаются всего на 10-20% от первоначальной.

Устойчивость арамидных волокон к действию химических веществ различной природы позволило широко применять их в различных областях техники. Исследования показали, что за исключением сильных кислот и щелочей агрессивные среды оказывают незначительное влияние на эти волокна.

При проектировании органопластиков необходимо правильно подобрать компоненты связующего, так как они существенно влияют на свойства композита. Большей частью характер этого влияния связан с протеканием в волокне релаксационных процессов и разориентации макромолекул. Так, в случае применения эпоксидных связующих наблюдается увеличение угла разориентации до 37%.

Таблица 1

Основные марки высокопрочных высокомодульных волокон из арамидов, выпускаемых в промышленном масштабе, и их свойства

Характеристика	Зарубежные волокна				Волокна России		
	кевлар		тварон				
	кевлар -49	кевлар -149	тварон -1000	тварон -НМ-000	СВМ, вниивлон	армос	терлон-СБ
Плотность, кг/м ³	1440	1470	1440	1450	1420-1450	1420-1450	1450
Прочность нити, ГПа	3,68	3,44	3,44	3,16	3,8-4,2	4,5-5,2	2,8-3,5
Модуль упругости нити, ГПа	116,64	179,14	85,00	120,50	145	170	190
Удлинение при разрыве, %	2,9	1,9	3,1	1,9-2,7	2,5-4,0	2,5-3,5	2,0-4,0
Кислородный индекс, %	28-30	28-30	29	—	30-33	—	30
Коэффициент теплопроводности вдоль оси волокна, Вт/м·К	0,050	—	0,050	—	0,045	—	0,040
Температура, °C:							
▪ стеклования	618	618	—	—	240	250	360
▪ усадки	—	—	—	—	400	400	420
▪ разложения	800	803	—	—	420	420	480
▪ воспламенения	—	—	—	—	580	580	430
Однонаправленный композит на основе волокон и эпоксидных связующих:							
▪ наполнение;	—	—	—	—	0,65	0,75	0,70
▪ прочность при растяжении, ГПа;	—	—	—	—	2,5-2,8	2,7-3,3	1,4-2,2
▪ модуль упругости при растяжении, ГПа;	—	—	—	—	85-95	95-100	90-100
▪ прочность при сжатии, ГПа;	—	—	—	—	0,25-0,35	0,3-0,5	—
▪ удлинение при разрыве, %	—	—	—	—	3,0	2,5-3,5	1,7

Арамидные волокна обладают достаточно высоким уровнем устойчивости к радиационному облучению. Так, например, волокно «терлон» сохраняет 58-77% прочности от исходной после радиационного облучения на воздухе дозой 10 000 Мрад. Волокно СВМ теряет только 25 % исходной прочности после облучения дозой 2000 Мрад в вакууме.

Текстильные материалы из арамидных волокон не поддерживают горения на воздухе. Как правило, они тлеют при действии открытого пламени. Тление быстро прекращается при выносе нитей или тканей из зоны горения.

Однако необходимо иметь в виду, что в случае воздействия воды на волокна типа Армос и последующего высушивания, прочностные показатели несколько снижаются. Модуль упругости (в эксперименте [3]) изменился со 150 ГПа до 107 ГПа, прочность – со 192 сН/текс (сантиньютон/текс) до 175 сН/текс. Поэтому необходимо изолировать волокна от воздействия влаги и иметь некоторый запас прочности.

Возможность использования этих волокон ограничивает их стоимость, которая достигает 200 \$ США за килограмм.

3.2. Композиционные материалы на основе углепластиков.

Углепластики – композиционные материалы на основе полимерной матрицы, армированной непрерывными или дискретными углеродными волокнами.

В России производят конструкционные углеродные нити марок: нить УКН-2500П, УКН-

5000П, ВМН-4, ВМН-5, Грапан-27, ГОСТ 28008-88. А также различные виды углеродных конструкционных тканей: УТ-400, УТ-900 и ленты углеродные конструкционные: ЛУП-0,1; ЛУП-0,2; ЛУ-24П, УОЛ-3001, УОЛ-3002, ГОСТ 28006-88 и пр. Ассортимент углеродных материалов достаточно широк. При этом стоимость углеродных материалов значительно ниже стоимости арамидных.

Таблица 2

Цена на углеволоконную продукцию ООО "БалЭнергоМаш", г. Балаково на 12 ноября 2002 г.

Наименование	Цена 1 кг с НДС (руб)
УКН-М-3К	2 803,15
УКН-М-6К	1 819,30
УКН-М-12К	1 732,67
УКН-2 500	2 856,55
УКН-5 000	1 857,90
ГРАПАН-27	1 819,30
УТ-400	2 980,75
УТ-900	3 556,93
УОЛ-300-1	2 185,09
УОЛ-300-2	3 541,33

Для углепластиков характерны высокая удельная прочность и жёсткость; низкие коэффициенты термического расширения и трения; высокая износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред, к термическому и радиационному ударам.

По удельной прочности и жёсткости углепластики превосходят почти все традиционные конструкционные полимерные и металлические материалы (табл. 3) [4].

Таблица 3

Основные характеристики некоторых, наиболее распространённых конструкционных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Удельная прочность, $\sigma \cdot 10^3$, км	Удельный модуль упругости, $E \cdot 10^{-6}$, км
Углепластик	1450-1600	0,78-1,80	120-130*	53-112	9-20
Стеклопластик (Е-волокно)	2120	1,92	69	91	3,2
Сталь (высокопрочная)	7800	1,40	210	18	2,7
Титановый сплав	4400	1,00	110	28	2,7
Полиамид 66	1140	0,83	28	7,24	0,24

* По данным М. Т. Азаровой [6], модуль упругости может достигать 170 ГПа, а в углепластике на основе нити или ленты «Кулон» - до 230 ГПа.

Углепластики обладают высокой химической стойкостью ко всем агрессивным средам, за исключением сильных окислителей.

4. Конструкция экспериментального полимерного полукольца аппарата Г. А. Илизарова

После сравнения свойств арамидных, углеродных и стеклопластиков приоритет был отдан углепластикам по следующим соображениям:

- арамидные композиты обладают лучшими эксплуатационными показателями, однако они слишком дороги;

- несмотря на высокую прочность конструкций из стеклопластиков, их несущая способность ограничена потерей устойчивости из-за относительно низкой жёсткости [6].

Так как полукольцо испытывает нагрузки как в собственной плоскости, так и перпендикулярно ей, то компоновка армирующих нитей должна быть по возможности изотропна. Для этих целей наиболее простым решением является применение армирующих волокон в виде ткани. В данном случае применена ткань УТ-900-2,5 из углеродных нитей УКН-П / 2 500.

Связующее выбрано с учётом того, что оно должно иметь хорошую смачивающую способность по отношению к нити, обеспечивающую низкую пористость композита, и высокую адгезионную прочность связи с ней, определяющую прочность композита при межслоевом сдвиге и, как следствие, механические свойства всего изделия. В эксперименте использовали эпоксидное связующее.

Технология получения композита состоит из следующих основных стадий: получение связующего в виде раствора олигомера с отвердителем; приготовление полуфабриката (препрега), путём пропитки ткани связующим; формирование слоистой заготовки в виде пакета пропитанных связующим листов ткани; прессование (отверждение).

Целью эксперимента является выбор материала, обеспечивающего физико-механические свойства, позволяющие использовать его для

изготовления колец и полуколец аппаратов Г. А. Илизарова. Поэтому было применено вырезание изделия из полученной слоистой заготовки механическим путём. Такая технология позволяет снизить экспериментальные затраты, отложив изготовление сложных пресформ на период подготовки серийного производства.

Физико-механические испытания углепластикового полукольца проводили на разрывной машине «Инстрон – 1195» при скорости перемещения зажимов – 10 мм/мин., температуре – 25°C.

Образцы полукольца соответствуют: каталожному номеру 10-1350, конструкторская документация – ОП-00.10.13.50 (внешний диаметр 134 мм, внутренний – 96 мм, толщина полукольца – 6 мм).

Образец крепили вертикально (рис. 3). При этом действие нагрузки осуществлялось в плоскости полукольца.

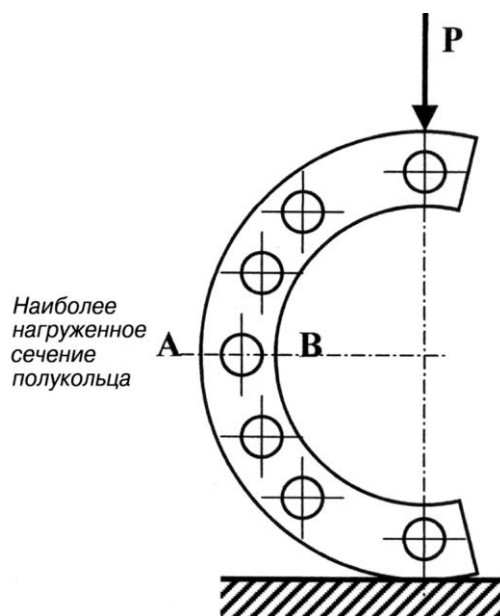


Рис. 3. Схема нагружения полукольца аппарата Г. А. Илизарова между зажимами разрывной машины при испытании на сжатие

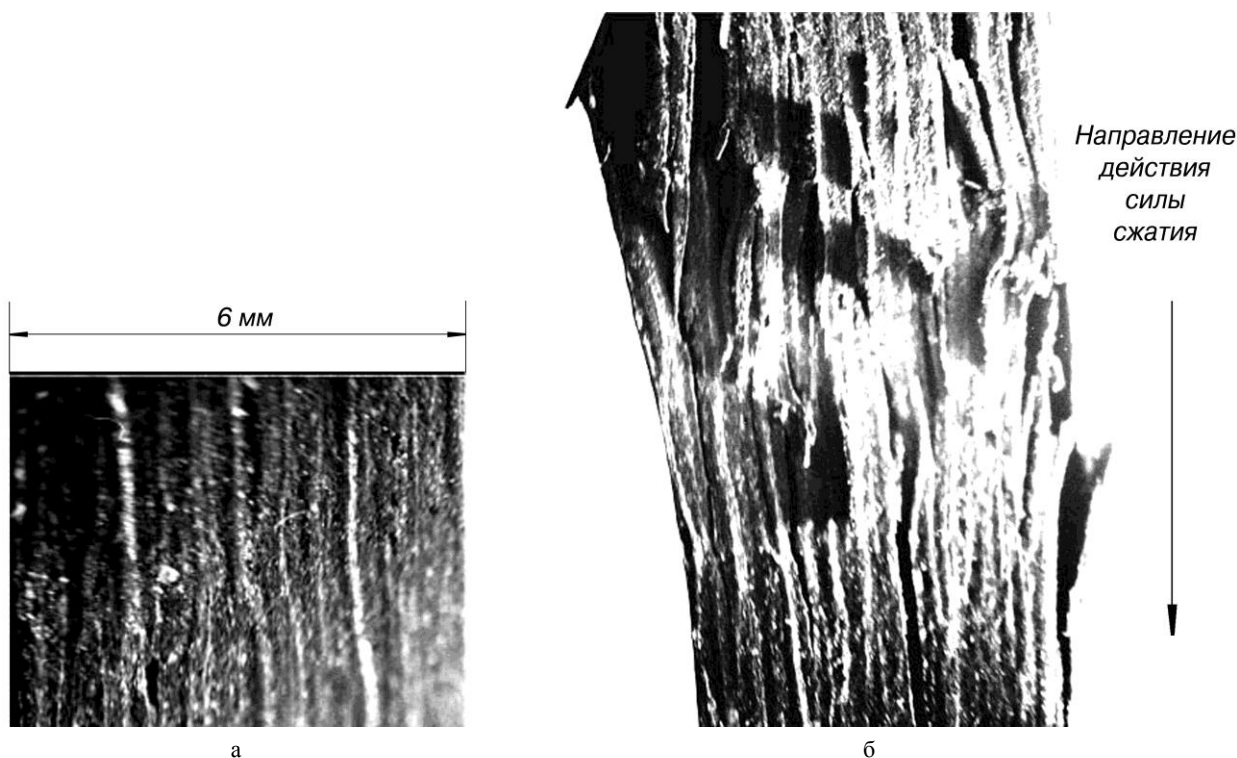


Рис. 4. Слоистая структура полукольца: а – до испытания на сжатие; б – после испытания

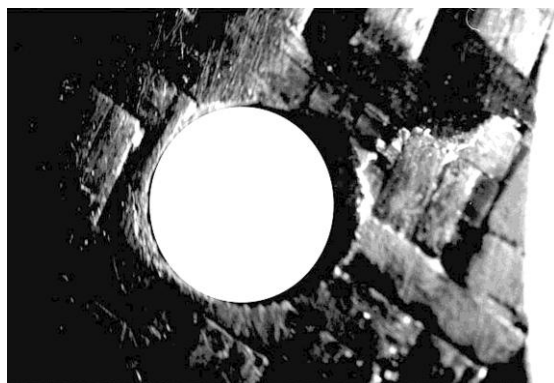


Рис. 5. Тканная структура поверхности полукольца. Место разрушения (внутренний диаметр – отверстие; область разрушения соответствует сечению А-Б, рис. 3) после испытания на сжатие

Разрушающая нагрузка при сжатии составила 2,2-2,3 кН (220-230 кгс).

Полученные результаты позволяют считать обоснованным выбор материалов полукольца, тем более, что результаты могут быть улучшены. Из рис. 4 видно, что слои углепластика повреждены частично. Дальнейшее совершенствование технологических параметров изготовления кольца (полукольца), структуры и свойств компонентов углепластика, позволят получить изделия с более высокими прочностными показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевцов, В.И. Аппарат Илизарова. Биомеханика / В.И. Шевцов, В.А. Немков, Л.В. Складар. – Курган: Периодика, 1995. – 165 с.
2. Шуц, С.А. Определение параметров нагружения конечности на типовых аппаратах внешней фиксации / С.А. Шуц, О.А. Джафарова, Б.С. Шуц // Мед. техника. – 2000. – № 1. – С. 21.
3. Армирующие химические волокна для композиционных материалов / Под ред. акад. Г.И. Кудрявцева. – М.: ХИМИЯ, 1992. – С. 7.
4. Воздействие воды на свойства нитей типа Армос / М.М. Иовлева, Л.Я. Коновалова и др. // Хим. волокна. – 2001. – № 1. – С. 22.
5. Перспективы применения конструкционных углепластиков в народном хозяйстве. Обзор. / Г.А. Будницкий, А.В. Захаров, В.С. Смирнов и др. // Химические волокна. – 1982. – № 2. – С. 5.
6. Азарова, М.Т. Высокопрочные высокомодульные углеродные волокна / М.Т. Азарова // Хим. волокна. – 1991. – № 3. – С. 6.
7. Конкин, А.А. Свойства и области применения композиционных материалов на основе углеродных волокон. Обзор. / А.А. Конкин, В.Я. Варшавский. // Хим. волокна. – 1982. – № 1. – С. 4.

Рукопись поступила 19.04.04.