

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕННОЙ РАЗОРИЕНТАЦИИ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА НАМОТОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Р.С. Зиновьев, Ю.А. Мережко

EXPERIMENTAL RESEARCH OF REINFORCED FILLER PURPOSEFUL DISORIENTATION INFLUENCE ON MATERIAL PROPERTIES OF A WOUND STRUCTURE

R.S. Zinoviev, Y.A. Merezhko

Формование намоточных подшипников скольжения из армированных реактопластов неизбежно ведет к нарушению первоначальной кольцевой формы армирующего наполнителя. Проведенные экспериментальные исследования влияния программированной разориентации наполнителя на свойства материала намоточной конструкции показали значительное улучшение технических характеристик подшипника.

Ключевые слова: намоточные конструкции, подшипники скольжения, армированные реактопласты, формование внешним давлением.

Pressure molding of filament wound friction bearings made of reinforced thermosetting plastics inevitably leads to failure of the original circular form of reinforced filler. Experiments showed that purposeful disorientation of reinforced filler have favourable effects on material properties of a wound structure considerably improving friction bearing performance.

Keywords: wound structures, friction bearings, reinforced thermosetting plastics, pressure molding.

Формование намоточных конструкций из армированных реактопластов (АР), в том числе трубчатых заготовок подшипников скольжения (ПС), силовой технологической рубашкой представляет собой частный случай создания равномерного внешнего давления, прикладываемого к намотанной заготовке на этапе отверждения и предназначенного для «подавления» радиальных растягивающих напряжений σ_r^+ , возникающих в материале и опасных ввиду его низкой прочности в условиях повышенных температур. Положительная роль равномерного внешнего давления заключается также в уплотнении структуры (снижении пористости, обеспечении водостойкости и герметичности), а также в повышении физико-механических характеристик композита.

В то же время известно, что опрессовка наружным давлением представляет процесс с повышенной опасностью возникновения нерегулярных искривлений армирующих волокон, т. е. образования зон провалов прочности, особенно опасных в краевых зонах подшипников. Опыт серийного производства подшипников из армированных реактопластов выявил большое количество подобных дефектов, при этом коэффициент вариации прочности материала при трансверсальном сжатии по периметру изделия достигает 13 %.

Проблема обеспечения бездефектной структуры материала, таким образом, заключается в реализации несовместимых требований:

– создании максимально возможного давления, способного подавлять растягивающие радиальные напряжения в материале на всех этапах переработки полимерного композиционного материала (условие обеспечения монолитности);

– ограничении внешнего давления до величины, при которой минимум суммарных окружающих напряжений (от намотки и приложения внешнего давления) равен нулю (условие устойчивости армирующего наполнителя).

Искривление армирующих волокон в намоточных конструкциях происходит не только из-за внешнего давления, прикладываемого к трубчатой заготовке на этапе намотки и отверждения, но и вследствие различия теплофизических свойств компонентов армированного полимера, а также усадочных явлений, возникающих в полимерной матрице (ПМ) в результате химических, термических и механических процессов, которые при наличии градиента температуры по толщине заготовки протекают крайне неравномерно. Неравномерности усадки и теплофизических свойств армирующих волокон и ПМ ведут к стесненному деформированию волокон, появлению внутренних сжимающих напряжений в армирующих волокнах. Поскольку матрица на этапе переработки до температуры стеклования T_g представляет вязкую среду, не обеспечивающую взаимодействия между армирующими волокнами, то под действием внутренних сжимающих напряжений при определенных условиях происходит потеря устойчивости их кольцевой формы. Искривленные волокна, занимающие большие зоны в конструкции, образуют дефекты макроструктуры армированного полимера в виде текстурной волнистости – свилеватости. Умение формулировать и прогнозировать условия, при которых появляются дефекты текстурной волнистости, и разумно управлять определяющими их параметрами переработки армированного полимера открывает возможность создавать намоточные конструкции с бездефектной структурой и более рационально использовать свойства исходных компонентов.

Структурную неустойчивость слоев арматуры в отвержденной матрице необходимо рассматривать в двух аспектах:

- в процессе возрастания внешней сжимающей нагрузки [1, 2];
- при длительном действии постоянных сжимающих усилий [3].

В первом случае матрица считается линейно-упругой средой, во втором – наделяется реологическими свойствами. Однако в обоих случаях критические параметры (нагрузка и время) находятся из соотношений, которые получены на основании моделей, представляющих армирующий наполнитель прямолинейными призматическими стержнями, лежащими на сплошном упругом основании. Подобная замена вполне оправдана, когда цель исследований состоит в определении несущей способности армированного полимера при сжатии, исчерпание которой может наступить из-за разрушения поверхности раздела в момент выпучивания армирующих элементов.

Особенность оценки критических параметров возникновения неустойчивости армирующих слоев в неотвержденной матрице состоит в том, что возникающие в процессе переработки технологические напряжения в армированном полимере изменяются в процессе отверждения ПМ и являются функциями температурно-временного режима формования конструкции. Сложность задачи усугубляется тем, что конверсионные и температурные поля в толстостенных намоточных конструкциях существенно неоднородны.

Возможность оценки управляющих параметров переработки материала в трубчатую заготовку для ПС наиболее точно может быть проведена с использованием расчетных зависимостей, приведенных в [4], где для определения критических параметров структурной неустойчивости армированного материала рассмотрена типичная конструкция для намоточных изделий в виде замкнутой круговой цилиндрической оболочки с поперечной схемой армирования (1:0). Материал оболочки такой структуры представляет собой армированную систему, состоящую из регулярно чередующихся по толщине замкнутых кольцевых слоев арматуры и прослойки ПМ. Пренебрежение спиральностью расположения витков оправдано из-за малой толщины наматываемой ленты. При построении модели приняты следующие допущения:

- слои арматуры и прослойки матрицы изотропны;
- физико-механические свойства армирующих элементов неизменны в течение всего температурно-временного режима;
- физико-механические свойства, в том числе и степень отверждения ПМ, а также температура в пределах объема, занимаемого одной прослойкой матрицы, постоянны, но зависят от места расположения прослойки в композиции;
- ПМ – линейно-упругая среда, эффективные характеристики которой являются функциями глубины превращения;

Расчет и конструирование

– в исходном докритическом состоянии внутренние усилия и деформации в матрице отсутствуют, а загружены лишь армирующие волокна.

Введенные предпосылки дали возможность авторам [1, 4] рассматривать задачу об искривлении волокон в квазиупругой постановке, но с учетом неоднородности конверсионного поля. Получены зависимости для определения критических усилий, при превышении которых наступает потеря устойчивости исходной формы армирующего элемента в среде ПМ. При этом рассмотрены характерные частные случаи, представляющие практический интерес:

1) случай симметричной формы потери устойчивости, критическое напряжение для которого определится формулой:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2h_a E_a E_M}{3h_M (1 - \mu_a^2) \left[1 - (\mu_M^0)^2 \right]}}, \quad (1)$$

где h_M – толщина полимерной прослойки (матрицы); h_a – толщина армирующего элемента; E_M – модуль упругости полимерной прослойки; E_a – модуль упругости армирующего элемента; μ_a – коэффициент Пуассона армирующего элемента; μ_M^0 – коэффициент Пуассона ПМ;

2) случай кососимметричной формы потери устойчивости, критическое напряжение для которого определится формулой:

$$\sigma_{кр} \approx 4G_M \left(1 + \sqrt{\frac{E_a}{24G_M} \cdot \frac{h_a}{R_j}} \right), \quad (2)$$

где G_M – модуль сдвига ПМ; R_j – радиус j -й прослойки;

3) случай потери устойчивости с нарастающей амплитудой прогиба, критическое напряжение для которого определится формулой:

$$\sigma_{кр} \approx 4G_M (\eta), \quad (3)$$

где η – степень полимеризации.

Из анализа выражений для критических напряжений, соответствующих различным случаям форм потери устойчивости, следует, что наиболее вероятной формой потери устойчивости армирующих волокон является кососимметричная, так как ей соответствует наименьшая критическая нагрузка [1, 4].

В работах [5, 6] приводятся теоретические и экспериментальные данные, показывающие, что различие в значениях модуля упругости в направлении армирования для материалов с искривленными и выпрямленными волокнами составляет 24–32 %, а различие в прочности этих материалов достигает 60 %. Особую опасность представляют эти дефекты для намоточных конструкций, работающих на сжатие. Резкое местное уменьшение жесткости, вызванное искривлением арматуры, существенно снижает критические параметры готовых намоточных изделий, что ведет к преждевременному их разрушению из-за потери устойчивости при внешнем нагружении.

Проведена расчетная и экспериментальная количественная оценка влияния текстурного дефекта на жесткостные характеристики материала трубчатой заготовки. Для заготовки из однонаправленного углепластика (при предположении синусоидального однофазного искривления волокна) такую оценку можно с достаточной степенью точности произвести с помощью выражения, предложенного Г.М. Гуняевым в [7]:

$$E_x^\phi = \frac{E_a v_a}{1 + \frac{E_a v_a (1 - v_a)}{G_M} \phi^2}, \quad (4)$$

где E_x^ϕ – модуль упругости в направлении волокон при однофазном искривлении; E_a – модуль упругости армирующего волокна; v_a – объемное наполнение волокон; G_M – модуль сдвига ПМ; ϕ – угол искривления.

Расчеты показывают, что коэффициент реализации модуля однонаправленного углепластика

$$K_\phi^E = \frac{E_x^\phi}{E_x} \quad (5)$$

при однофазном искривлении волокон уменьшается с 0,97 до 0,88 при увеличении угла искривления от 5 до 10°.

Влияние текстурной волокнистости на прочностные характеристики трубчатых заготовок из стеклопластика оценивается зависимостью, позволяющей вычислить прочность σ_x^ϕ в любом направлении по отношению к оси волокон на основании экспериментально полученных значений в продольном (σ_x), поперечном (σ_y) и диагональном ($\sigma_{\pi/4}$) направлениях [7]:

$$\sigma_x^\phi = \frac{\sigma_x}{\cos^4 \phi + \left[\frac{\sigma_x}{\sigma_{\pi/4}} - \frac{\sigma_x}{4} + \frac{1}{4} \right] \sin^2 2\phi + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \sin^4 \phi} \quad (6)$$

Коэффициент реализации прочности стеклопластика

$$K_\phi^\sigma = \frac{\sigma_x^\phi}{\sigma_x} \quad (7)$$

уменьшается до 0,8 при увеличении угла искривления до 10°.

Экспериментальное определение E_x^ϕ и σ_x^ϕ на образцах, изготовленных из углепластиковых и стеклопластиковых трубчатых заготовок, показало хорошее совпадение с расчетными данными (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные характеристики материалов трубчатых заготовок

Материал трубчатой заготовки	$E_x \cdot 10^{-4}$, МПа	σ_x , МПа	ϕ , град	$E_x^\phi \cdot 10^{-4}$, МПа (эксп.)	σ_x^ϕ , МПа (эксп.)	K_ϕ^E , (эксп.)	K_ϕ^E , (расч.)	K_ϕ^σ , (эксп.)	K_ϕ^σ , (расч.)
Углепластик однонаправленный	15,5		10	13,6		0,87	0,88		
Стеклопластик на основе ткани Т-10-80		500	10		380			0,76	0,80

Влияние искривлений (в случае синусоидально искривленных волокон) на деформативные свойства в трансверсальном направлении менее значительно [8]. В самом деле, из формулы [9]:

$$E_r^f = E_r / \left(1 + \frac{E_r}{G_{r\phi}} \cdot \frac{f^2}{2} \right), \quad (8)$$

где E_r^f – модуль упругости материала перпендикулярно армирующим слоям с изогнутыми волокнами; E_r – модуль упругости материала перпендикулярно армирующим слоям с выпрямленными волокнами; $G_{r\phi}$ – модуль сдвига материала; $f = A(\pi n / l)$ – параметр, характеризующий искривление волокон; A – амплитуда синусоиды; n – число полуволов на базе l , – видно, что только при больших значениях A следует ожидать значительного снижения E_r^f , так как E_r и $G_{r\phi}$ – величины одного порядка. В то же время при оценке надежности узла трения следует учитывать даже незначительный разброс упругих свойств материала. Коэффициент реализации K_r^E угле-стеклопластика в радиальном направлении изменяется в диапазоне 0,91–0,95.

В то же время анализ экспериментальных данных, полученных на серийно изготавливаемых втулках (табл. 2), показывает, что разброс прочности при трансверсальном сжатии по периметру втулки, обусловленный свилеватостью материала, достигает 142 МПа, коэффициент вариации прочности составляет 12,84 %. Особую опасность представляют эти дефекты, сконцентрированные в одной из торцевых зон втулки, где кромочные напряжения, обусловленные монтажными и эксплуатационными перекосами осей элементов узла трения (корпус, втулка, ось), являются наиболее вероятными. Создание конструкции подшипника бездефектной структуры с повышенными физико-механическими характеристиками необходимо связывать поэтому не только с умением формулировать и прогнозировать условия, при которых появляются дефекты текстурной волнистости, но и с разработкой и внедрением новых приемов переработки армированного полимера.

Таблица 2

Прочностные характеристики втулки ПД-010.00.00.010-13 ($\phi 120 \times \phi 140 \times 100$), замеренные по ее периметру

Показатель	Зона											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
σ_r^- , МПа	308	214	352	278	340	310	331	198	327	329	324	301
$\sigma_{r\text{cp}}^-$, МПа	301,1											
Коэффициент вариации, %	12,84											

Снижения разброса свойств и общего повышения свойств ПКМ в радиальном направлении предложено добиться методом создания направленной разориентации армирующего наполнителя по периметру и толщине трубчатой заготовки.

Сущность метода заключается в том, что при опрессовке заготовки слои армирующего наполнителя искривляются равномерно относительно исходной круговой формы с переменной амплитудой прогиба по толщине заготовки. Схематично процесс формования заготовки с созданием направленной разориентации армирующего наполнителя можно представить следующим образом (рис. 1):

– трубчатая заготовка наматывается на оправку радиусом $R_{\text{оп}} = R_b$ с набором толщины $h = R_{\text{заг}} - R_b$;

– давление формования $P_{\text{ф}} = P_{\text{нэ}} + P_{\text{гс}}$ осуществляется формовочным корсетом, выполненным в виде равномерно расположенных по периметру заготовки нажимных элементов диаметром $d_{\text{нэ}}$, связанных между собой гибкой связью;

– усилие формования создается намоткой поверх нажимных элементов опрессовочной ленты, причем усилие натяжения $T_{\text{н}}$ опрессовочной ленты задается таким, чтобы обеспечить нарастающую (со стороны R_b) по толщине заготовки амплитуду прогиба разориентированных слоев наполнителя, т. е. создание условия $\chi_{j+1} > \chi_j > \chi_{j+1}$, где χ_j – амплитуда полуволны разориентированного j -го слоя.

Реализация заданной программы разориентации армирующего наполнителя связана с определением формы кривой j -го слоя по толщине заготовки и необходимого усилия натяжения $T_{\text{н}}$ опрессовочной ленты.

В общем виде кривая с нарушенной круговой формой армирующего наполнителя запишется в виде:

$$\omega_j(y) = \chi_j \cos(\alpha_j \cdot y + \theta_j), \quad (9)$$

где α_j – параметр, характеризующий длину полуволны;

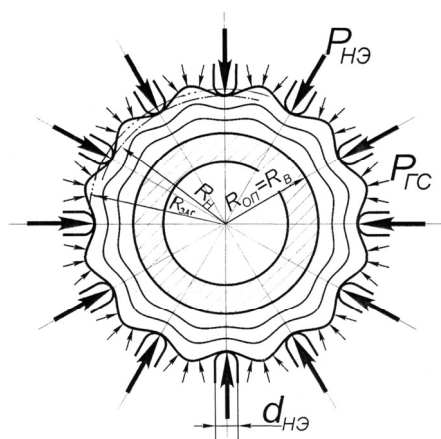


Рис. 1. Схема направленной разориентации армирующего наполнителя в процессе формования силовой рубашкой

$$(\alpha_j)^{-1} = r_j \cdot n^{-1},$$

где n – число полных волн, образующихся при нарушении устойчивости круговой формы кольцевого слоя армирующего наполнителя; r_j – радиус j -го слоя; θ_j – параметр, характеризующий сдвиг по фазе устойчивости j -го армирующего элемента относительно смежных слоев.

Граничные условия для случая деформации намотанного пакета трубчатой заготовки с нарастающей со стороны внутреннего диаметра прогиба:

– первый кольцевой (антифрикционный) слой не изменяет своей круговой формы, так обеспечиваются условия полного прилегания антифрикционного слоя подшипника к формообразующей поверхности технологической оправки, т. е.

$$\chi_1 = 0; \quad (11)$$

– деформация каждого вышележащего слоя больше нижележащего, т. е. разориентация армирующих слоев – равномерная по периметру трубчатой заготовки в каждом последовательно нанесенном слое:

$$\theta_{j-1} = \theta_j = \theta_{j+1}. \quad (12)$$

Подставляя (10)–(12) в (9), имеем формулу кривой:

– разориентированного j -го слоя

$$\omega_j(y) = \chi_j \cos(r_j n^{-1} \cdot y); \quad (13)$$

– внутреннего слоя

$$\omega_j = 0; \quad (14)$$

– разориентированного наружного слоя подшипника

$$\omega_{RH} = \chi_{RH} \cdot \cos(R_n \cdot n^{-1}); \quad (15)$$

– разориентированного слоя намотанной заготовки

$$\omega_{заг} = \chi_{заг} \cos(R_{заг} \cdot n^{-1}). \quad (16)$$

Технологическая реализация кривых (13)–(16) связана с определением оптимальной величины обжатия $\chi_{заг}$ в зоне нажимных элементов формовочного корсета и усилия натяжения T_H опрессовочной ленты.

Варианты схем формовочного корсета и обжатия заготовок представлены на рис. 2, из которого видно, что максимальная величина $\chi_{заг}$ обеспечивается формовочным корсетом по варианту 3, т. е. при размещении гибкой связи по верхним краям нажимных элементов. Отмечается также, что величина $\chi_{заг}$ зависит от диаметра нажимных элементов, а давление формования $P_{ГС}$ – от упругих свойств гибкой связи.

Исследование деформативных свойств заготовки при использовании формовочного корсета осуществлялось на плоских образцах по диаграмме $\sigma_r^- - \epsilon$ при поперечном сжатии. На рис. 3 приведены сравнительные деформативные кривые при обжатии пакета полуфабриката (33 слоя стеклоткани Т-10-80) двумя типами инденторов: плоским и снабженным нажимными элементами $\varnothing 5$ мм с шагом 20 мм. Из графика видно, что:

– пределы пропорциональности $\sigma_{r,кр}^-$ при обжатии полуфабриката по схемам 1 и 2 примерно одинаковы, однако при обжатии по схеме 2 уплотнение полуфабриката происходит при большей степени обжатия ($\epsilon = 20\%$ при $\sigma_{r,кр}^- = 0,5$ МПа);

– коэффициент анизотропии уплотняемого по схеме 2 пакета полуфабриката после $\sigma_{r,кр}^-$ ниже, чем пакета, уплотняемого по схеме 1, что обуславливает большую равномерность упругих свойств по толщине заготовки и меньшее влияние технологических несовершенств на разброс характеристик материала;

– нелинейность деформативной кривой при обжатии полуфабриката по схеме 2 выражена в большей степени за счет одновременно протекающих процессов уплотнения пакета и трансверсальной разориентации уложенных слоев наполнителя.

Эффективность метода направленной разориентации на плоских образцах оценивалась путем анализа экспериментальных значений характеристик (табл. 3) отвержденных стеклопластиков с вышеприведенными структурными параметрами, формование которых производилось по схемам 1 и 2 (рис. 3).

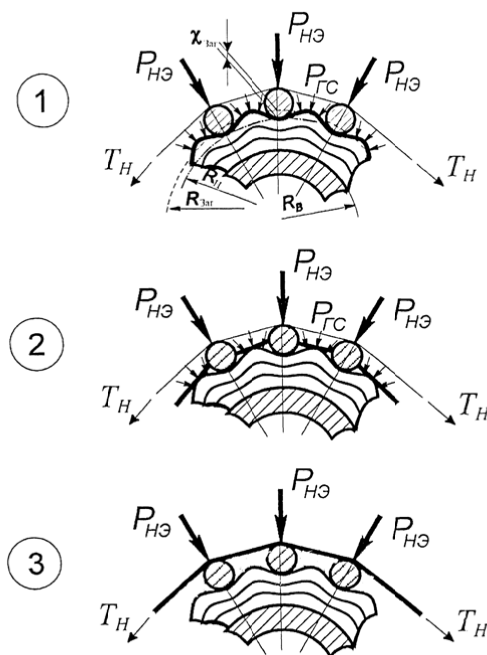


Рис. 2. Варианты схем технологической реализации способа обжатия трубчатой заготовки формовочным корсетом

Таблица 3

Характеристики стеклопластиков, изготовленных по схемам 1 и 2 (см. рис. 3)

Схема изготовления	Количество образцов, n , шт.	Степень отверждения, η , %	Содержание смолы, v , %	Плотность, γ , кг/м ³	Твердость HRC (ГОСТ 24622-91)
1. Плоский идентор	38	92	37–44	1610	80
2. Выступы	38	92	32–39	1620	97
Впадины	37	92	19–23	1930	110

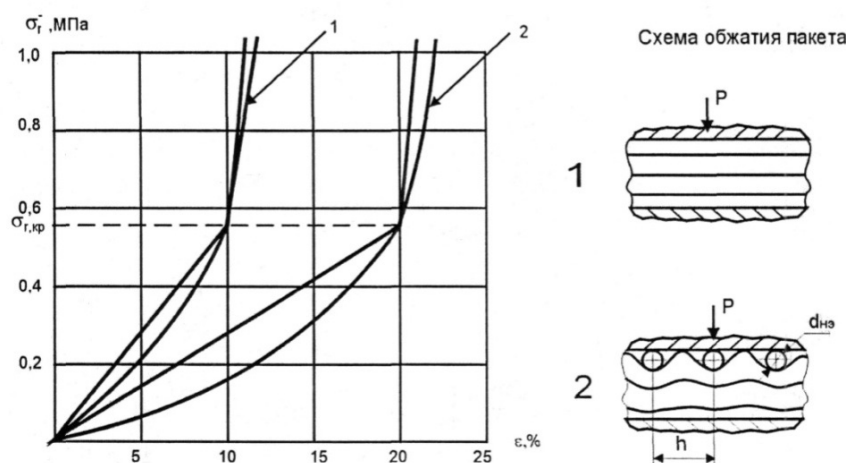


Рис. 3. Диаграммы $\sigma_r - \epsilon$ при поперечном сжатии полуфабриката:
1 – по схеме 1; 2 – по схеме 2

Проблема технологической реализации рассматриваемого метода заключается в разработке наиболее технологичной конструкции опрессовочного устройства, не привносящего в процесс намотки дополнительных временных затрат и в то же время обеспечивающего выполнение заданных конструкторско-технологических параметров переработки (диаметр нажимного элемента, их количество и шаг их расположения по периметру намотанной заготовки). Исследовано несколько вариантов конструктивного исполнения опрессовочных устройств, с помощью которых произведена технологическая отработка метода при изготовлении трубчатых заготовок ПС. Наиболее эффективным был признан универсальный формовочный корсет (рис. 4), нажимные элементы которого выполнены из фторопластовых стержней (ТУ6-05-810-88), связанных друг с другом металлической проволокой. Основное достоинство такого корсета – возможность многократного использования, что обеспечивается простотой его подготовки к повторной опрессовке. Полимерное связующее, мигрирующее в процессе опрессовки к наружным слоям заготовки, достаточно легко очищается с поверхности фторопластовых стержней.

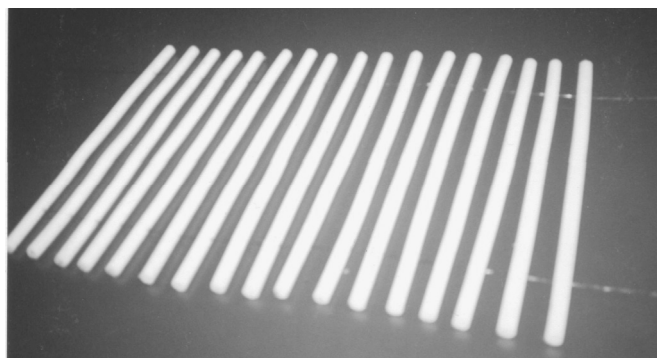


Рис. 4. Формовочный корсет с нажимными элементами из фторопласта-4

Проведенная с использованием вышеуказанных опрессовочных устройств конструкторско-технологическая отработка метода направленной разориентации [10, 11] показала существенное улучшение не только трансверсальной прочности материала, но и стабильности свойств по периметру заготовки (табл. 4).

На основании созданного метода разработан технологический процесс [11] изготовления намоточных ПС из армированных реактопластов (рис. 5), с 1999 года осуществляется их серийное изготовление.

Таблица 4
Сравнительные характеристики материала втулок ПД-036.00.04.011 с различными способами опрессовки

Способ опрессовки	Кол-во втулок, шт.	Масса втулки, кг	Плотность, кг/м ³	Содержание смолы, %	Прочность при сжатии, σ_r^-	
					Величина, МПа	Коэф. вариации, %
Опрессовка стеклолентой ЛЭС	22	0,67–0,672	1580	37–44	320	12,1
Опрессовка с помощью формовочного корсета (см. рис. 4)	22	0,73–0,748	1740* 1920**	31–38* 19–21**	409* 471**	8,1* 8,0**

* – свойства материала по выступам; ** – свойства материала по впадинам.

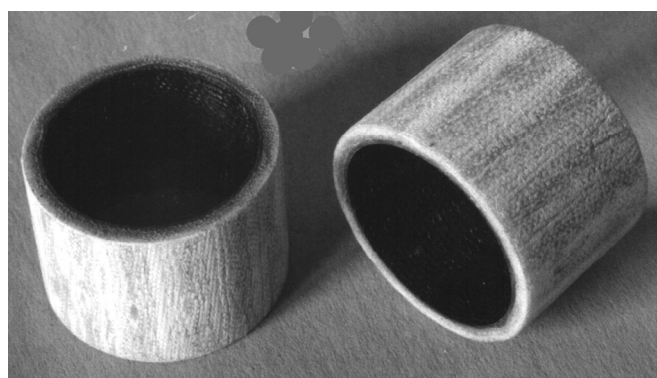


Рис. 5. Общий вид ПС с направленной разориентацией наполнителя

Таким образом, снижения разброса свойств и повышения трансверсальной прочности армированных реактопластов при сжатии можно добиться разработанным и внедренным в ООО «НПП „Полидор“» методом формования трубчатых заготовок с направленной разориентацией армирующего наполнителя путем опрессовки заготовки силовой рубашкой с регулярно расположенными по периметру нажимными элементами. Удалось добиться повышения σ_r^- на 27–47 %, снизить разброс характеристик на 34 %.

Литература

1. Теория и методы обеспечения бездефектной макроструктуры армированных полимеров при переработке в конструкции специальной техники / В.Т. Томашевский, В.И. Смыслов, В.Н. Шалыгин, В.С. Яковлев. – М.: ЦНИИИнформации, 1984. – 316 с.
2. Рабинович, А.Л. Сжатие армированного заполнителя из полимерных материалов / А.Л. Рабинович // Труды МФТИ. – М.: Оборонгиз, 1961. – Вып. 7. – С. 3–19.
3. Андреев, Х.А. Устойчивость полимерных стержней при ползучести / Х.А. Андреев // Механика полимеров. – 1968. – № 1. – С. 145–150.
4. Научные основы и методы управления технологическими процессами переработки полимерных композитных материалов в изделия машиностроения / И.Ф. Образцов, В.Т. Томашевский, В.Н. Шалыгин, В.С. Яковлев; под общ. ред. В.Т. Томашевского. – М.: НИИСтали, 2001. – 428 с.
5. Тарнопольский, Ю.М. Особенности расчета деталей из армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе. – Рига: Зинатне, 1969. – 274 с.
6. Влияние натяжения и искривления армирующих волокон на прочность и деформативность стеклопластиков / под ред. Ю.М. Тарнопольского и В.В. Перова. – М.: ВИАМ, 1966. – 54 с.
7. Гуняев, Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов / Г.М. Гуняев. – М.: Химия, 1981. – 232 с.

8. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

9. Тарнопольский, Ю.М. Отрицательные особенности материалов, армированных волокнами / Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе, Г.Г. Портнов // Механика полимеров. – 1969. – № 1. – С. 140–149.

10. ПД ТП 023-97. Технологический процесс изготовления трубчатых заготовок подшипников скольжения из ПКМ. – Челябинск: НПП «Полидор», 1997. – 63 с.

11. Выбор технологической оснастки для опрессовки трубчатых заготовок: инструкция ПД ИН 17/06-03. – Челябинск: НПП «Полидор», 2003. – 54 с.

Поступила в редакцию 15 февраля 2012 г.

Зиновьев Радий Сергеевич. Кандидат технических наук, доцент, технический директор ГНПК «Полидор», г. Челябинск. Область научных интересов – способы переработки полимерных композиционных материалов. Тел.: (351) 903-34-89; e-mail: zinoviev@polidor.ru

Radii S. Zinoviev. Candidate of engineering science, associate professor, technical director of “Polidor” group of companies, Chelyabinsk. The area of scientific interests – methods & technology of processing of polymer composite materials. Tel.: (351) 903-34-89; e-mail: zinoviev@polidor.ru

Мережко Юрий Александрович. Кандидат технических наук, председатель совета директоров группы научно-промышленных компаний «Полидор», г. Челябинск. Область научных интересов – внедрение современных технологических процессов изготовления изделий из полимерных композиционных материалов. Тел.: (351) 247-94-07; e-mail: merezhko@polidor.ru

Yuri A. Merezhko. Candidate of engineering science, chairman of the Board, “Polidor” group of companies, Chelyabinsk. The area of scientific interests – innovative technologies in manufacturing details made of polymer composite materials. Tel.: (351) 247-94-07; e-mail: merezhko@polidor.ru