



УДК 678:621.74.042 – 036.6/8

© С. П. Захарычев, В. А. Иванов, В. А. Авдеев, С. В. Гончаров, 2007

## СОЗДАНИЕ СТАНКА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Захарычев С. П.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса»; *Иванов В. А.* – завкафедрой «Машины и оборудование лесного комплекса» д-р техн. наук, проф.; *Авдеев В. А.* – ст. науч. сотр.; *Гончаров С. В.* – инженер кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», аспирант (ТОГУ)

Центробежное формирование изделий из металлов и различных пластмасс широко применяется в машиностроении для производства деталей вращения. Изготовление деталей в виде втулок из антифрикционных полимерных многокомпонентных компаундов требует проведения глубоких исследований явлений, протекающих в процессе полимеризации композиций. Для изучения влияния термодинамических условий формирования на физико-механические и другие качественные показатели изделий требуется создание соответствующего оборудования.

The centrifugal shaping of the metal and plastic products is broadly used for producing rotation parts in machinebuilding industry. The fabrication of bushings made of antifriction polymeric multicomponent compounds requires deep research of composite polymerization process. Examining the influence of the thermodynamic conditions on shaping physical, mechanical and other qualitative factors of the products requires a corresponding equipment.

Изучение процесса центробежного формирования (ЦБФ) изделий типа втулок из многокомпонентных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходимо для получения качественных деталей узлов трения машин и других конструкций. Даже в узлах трения машин возвратно-поступательного движения наиболее часто используются втулки и кольца, например в уплотнительных системах гидроцилиндров.

Технология центробежного формирования изделий из литевых полимерных композиций обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими известными способами производства. Она позволяет уменьшить суммарную трудоемкость процессов путем сокращения времени изготовления деталей требуемых размеров, обеспечивает достаточную степень точности изделий, значительно уменьшает количество отходов при выполнении финишных механических операций, необходимых для достижения требуемых допусков размеров и чистоты рабочих поверхностей. Процесс достаточно легко автоматизируется.

От состава и структуры элементарных слоев по толщине втулки зависят основные триботехнические свойства подшипника скольжения или кольцевого уплотнения – коэффициент трения, интенсивность износа, путь трения (время эксплуатации). Поверхностный слой антифрикционного материала в паре трения «вал – втулка» неизбежно подвергается износу под действием сдвига и напряжений от внешних нагрузок, попадания абразивов в смазку. Внутренняя структура слоя материала определяется составом полимерной композиции и термодинамическими условиями процесса центробежного литья композиционного изделия.

Величина центробежной силы вычисляется по известной формуле

$$C = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса композиции, находящейся в форме, кг;  $v$  – окружная скорость, м/с;  $r$  – внутренний радиус формы, м.

Окружная скорость связана с угловой скоростью и частотой вращения:

$$v = \omega r = \frac{2\pi \cdot n}{60} r = \frac{\pi \cdot n}{30} r, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  $n$  – частота вращения формы, мин<sup>-1</sup>.

Преобразуя формулу (1), получим

$$C = \frac{m \cdot v^2}{r} = m\omega^2 r = \frac{m\pi^2 n^2 r}{900} = \frac{m\pi^2 n^2}{1800} D, \quad (3)$$

где  $D = 2R_2$  – внешний диаметр слоя композита, м (рис. 1).

Давление от центробежной силы в слое композиции



$$\Delta p_{ц} = \frac{C}{F}, \quad (4)$$

где  $C$  – центробежная сила, Н;  $F$  – площадь поверхности слоя, м<sup>2</sup>.

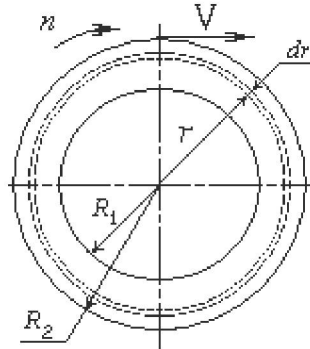


Рис. 1. Схема поперечного разреза втулки

Преобразуем выражение (4) для давления в слое композиции:

$$\Delta p_{ц} = \frac{C}{F} = \frac{mv^2}{R_2 \pi DL} = \frac{mv^2}{2\pi R_2^2 L}, \quad (5)$$

где  $L$  – рабочая длина формы – длина слоя композиции, м.

Масса элементарного слоя  $dm$  может быть выражена через соотношение

$$dm = \rho_c 2\pi r L dr, \quad (6)$$

где  $\rho_c$  – плотность смеси в данном слое композиции, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – радиус кольца, м;  $dr$  – толщина элементарного слоя композиции, м.

Величину центробежной силы, действующей в элементарном слое, можно выразить в виде

$$dC = \rho_c 2\pi r L dr v^2 = \rho_c 2\pi r L dr \left( \frac{\pi^2 n^2 r}{900} \right). \quad (7)$$

Здесь  $2\pi r L = F$  – площадь слоя композиции, а произведение  $2\pi r L dr = dV$  – объем элементарного слоя.

Из выражения (7) следует, что величина центробежной силы пропорциональна квадратам частоты вращения и радиусу окружности формирующегося слоя композиции и зависит от плотности смеси композиции.

В то же время давление в элементарном слое определяется отношением центробежной силы к площади поверхности кольца (4), (5), оно изменяется пропорционально росту силы и обратно пропорционально площади кольца:

$$\frac{dC}{F} = dp_{ц} = \rho_c \frac{\pi^2 n^2}{900} r dr. \quad (8)$$

Проинтегрируем (8): давление изменяется от 0 до  $p_{ц}$  при изменении радиуса от  $R_1$  до  $R_2$ :

$$\int_0^{p_{ц}} dp_{ц} = \rho_c \frac{\pi^2 n^2}{900} \int_{R_1}^{R_2} r dr. \quad (9)$$

Давление, развиваемое центробежной силой на внешней поверхности кольца композиции:

$$p_{ц} = \rho_c \frac{\pi^2 n^2}{1800} (R_2^2 - R_1^2). \quad (10)$$

Здесь  $n$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ .

Через угловую скорость можно получить другое выражение:

$$p_{ц} = 20 \rho_c w^2 (R_2^2 - R_1^2) = 5 \rho_c w^2 (D_2^2 - D_1^2), \quad (11)$$

где  $w$  – угловая скорость вращения формы,  $\text{с}^{-1}$ .

При вращении формы с гомогенной суспензией разнородных компонентов под действием центробежной силы происходит расслоение – ликвация компонентов. Процесс ликвации обусловлен тем, что специальные наполнители композиции имеют разные плотности – больше или меньше плотности основной дисперсной среды – матрицы, которой в данном случае является эпоксидная смола. При повышении частоты вращения, увеличении диаметра формы и толщины формирующегося кольца композиции под действием центробежной силы возрастает давление от нуля на внутренней поверхности кольца до максимального – на внешней.

Фактором разделения при вращении называется отношение ускорения центробежной силы к ускорению силы тяжести:

$$f = \frac{w^2 r}{g} \approx 20 \frac{dn^2}{g} \approx 20 Fr_{ц}^*, \quad (12)$$

где  $Fr_{ц}^*$  – модифицированный критерий Фруда – безразмерная величина, применяемая в теории гидродинамического подобия.

Фактор разделения является важной характеристикой при центробежном формировании, т. к. при прочих равных условиях разделяющее действие возрастает пропорционально величине  $K_p$ . Склон-



ность к расслоению смеси увеличивается с ростом фактора разделения – с увеличением диаметра слоя и особенно частоты вращения заготовки. Перепад давления по толщине кольца композиции при определенных условиях вызывает радиальные перемещения в слоях композиции твердых дисперсных частиц – наполнителей. Очевидно, что под действием центробежной силы наполнители с меньшей плотностью будут стремиться к перемещению во внутренние слои изделия, а наполнители с большей плотностью – в наружные слои.

Процесс расслоения – перехода от гомогенного состояния суспензии к гетерогенному – может быть зафиксирован в конечной структуре ПКМ. При этом структура слоев втулки будет зависеть как от отмеченных выше кинематических и физических параметров, времени протекания процесса, так и от скорости полимеризации, т. е. и от температуры компаунда, которая с ростом будет несколько уменьшать начальную вязкость, но в то же время значительно ускорять процесс полимеризации.

Для изучения влияния термодинамических и технологических факторов способа центробежного формирования на качественные характеристики изделий антифрикционного назначения из ПКМ создан станок СЦФ-4 для центробежного формирования изделий на базе токарного станка типа ЦБК-Р105 (рис. 2).

Станок содержит станину со шпиндельным узлом и задней бабкой, кожух защиты рабочей зоны станка, калориферное устройство (тепловентилятор) и электронный блок управления. Защита вращающихся деталей – кожух выполнен таким образом, чтобы максимально обеспечить герметичность рабочей зоны. Задняя стенка кожуха остается неподвижной, она связана с откидывающейся верхней частью при помощи шарниров. На неподвижной задней части корпуса защиты смонтировано устройство нагрева воздуха. Оно выполнено в металлическом корпусе, имеет теплоэлектронагреватель (ТЭН) с максимальной мощностью 500 Вт и снабжено вентилятором. Температура воздуха на выходе нагревателя может достигать 400 °С. Регулирование температуры нагрева рабочей зоны осуществляется за счет изменения периода импульсов электрического тока в ТЭНе. Электронный блок управления теплоэлектронагревателем собран на микропроцессоре. Температура воздуха на выходе измеряется термопарой, сигнал с которой поступает на контроллер. Требуемая температура задается аналоговым сигналом 0–10 В, который поступает с промышленного контроллера «LOGO!» фирмы «Сименс» (рис. 3).

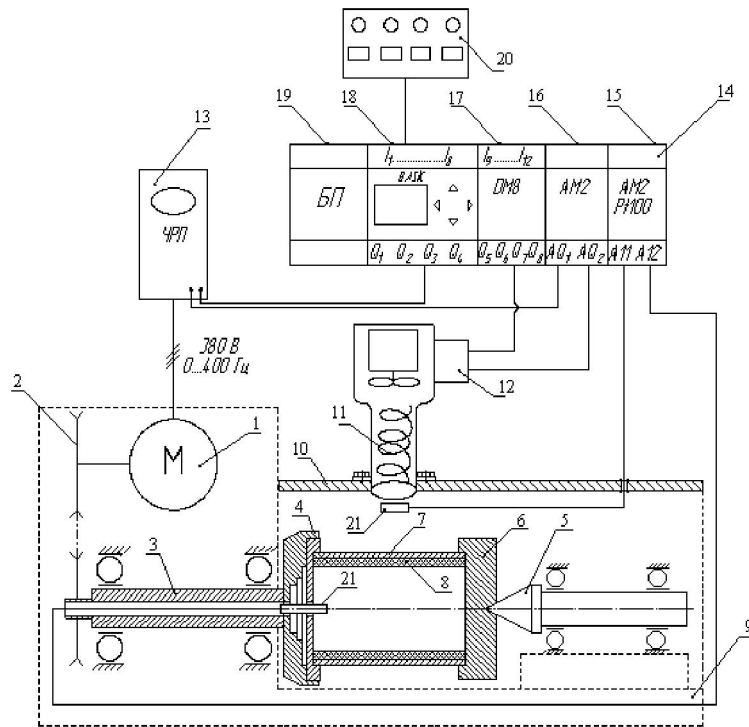


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизации станда для центробежного формования изделий из ПКМ:

- 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – вал шпинделя;  
4 – планшайба; 5 – задняя бабка; 6 – крышка формы; 7 – форма;  
8 – композит; 9 – станина; 10 – кожух защитный; 11 – ТЭН; 12 – блок управления ТЭНом; 13 – блок частотного регулирования привода;  
14 – процессор «LOGO!» (ф. Сименс, Германия); 15 – аналоговый модуль датчиков температуры AM2; 16 – аналоговый модуль AM2 управления ТЭНом; 17 – цифровой модуль DM8; 18 – процессорный модуль «LOGO! BASIC»; 19 – блок питания; 20 – пульт управления;  
21 – датчики температуры Pt 100

Усовершенствование механического привода заключается в применении частотного электронного управления двигателем. Система управления включает в себя частотно-регулируемый привод на 3,7 кВт, промышленный контроллер «LOGO!», кнопочный пульт, источник питания на 24 В, приборы электрозащиты. Преобразователь частоты SV004iC5-1F-RUS-0.4 имеет векторное управление без датчика в диапазоне частот от 0 до 300 Гц и изменяет обороты шпинделя в пределах 0–6 000 мин<sup>-1</sup>.



Промышленный контроллер «LOGO!» специально сконфигурирован под установку центробежного формования и включает в себя базовый блок, блок расширения цифровых входов/выходов (4 in/out), блок расширения аналоговых выходов, блок расширения для датчиков температуры Pt100. Контроллер управляет работой частотно-регулируемого привода, нагревателя и обеспечивает работу установки по заданной программе, обрабатывая необходимые режимы формирования полимерных покрытий. Для управления скоростью вращения формы процессорный модуль «LOGO! BASIC» посылает сигнал на преобразователь частоты, который изменяет частоту от 0 до 100 Гц.



Рис. 3. Блоки управления СЦФ-4: преобразователь частот (справа) и промышленный логический контроллер «LOGO!»

Пульт управления существенно упрощен, но при этом остался полностью функциональным. На переднюю панель вынесен 7-сегментный дисплей, две кнопки управления ("Пуск" и "Стоп") и потенциометр для задания скорости. Преобразователь частоты может управлять внешними цифровыми и аналоговыми сигналами. Для работы в промышленной информационной сети преобразователь имеет интерфейс RS-485, ModBUS-RTU, с помощью которого могут быть подключены до 32 устройств, скорость обмена составляет 19,2 кб/с.

Программное обеспечение предназначено для составления схем управления на персональном компьютере. Программа составляется в виде схемы функциональных блоков. После того как схема управления

составлена и отлажена программным симулятором, код программы с помощью USB-PPI адаптера загружается в контроллер.

Составление программ для технологических испытаний центробежного формирования изделий проводится по следующей схеме:

1. Составляется циклограмма формирования покрытия ПКМ.
2. Определяются назначения входов и выходов контроллера.
3. На персональном компьютере в программе «LOGO! Soft Comfort» составляется функциональная схема управления режимами формирования ПКМ деталей согласно плану эксперимента.
4. Загружается код программы в контроллер.

Исследования технологии центробежного формирования изделий из ПКМ разделены на ряд этапов по возрастанию сложности технологических режимов:

- этап I – одно- и двухфазные модельные ПКМ на постоянных частотных и температурных режимах ЦБФ;
- этап II – двухфазные ПКМ на постоянных и динамических режимах;
- этап III – многофазные ПКМ на динамических режимах ЦБФ.

Работы по этапу I включали исследования влияния температурных и скоростных постоянных режимов ЦБФ при использовании одно-, двух- и трехфазных композиций ПКМ на качественные характеристики отливок. Для экспериментов использовалась форма постоянных размеров (рис. 4) – втулка с внутренними размерами  $d \times L = 54 \times 54$  мм. Температурные режимы составляли 30, 40, 50 °С; частоты вращения – 300, 1 200, 2 400 мин<sup>-1</sup>; время формирования – 30, 60, 90 мин.

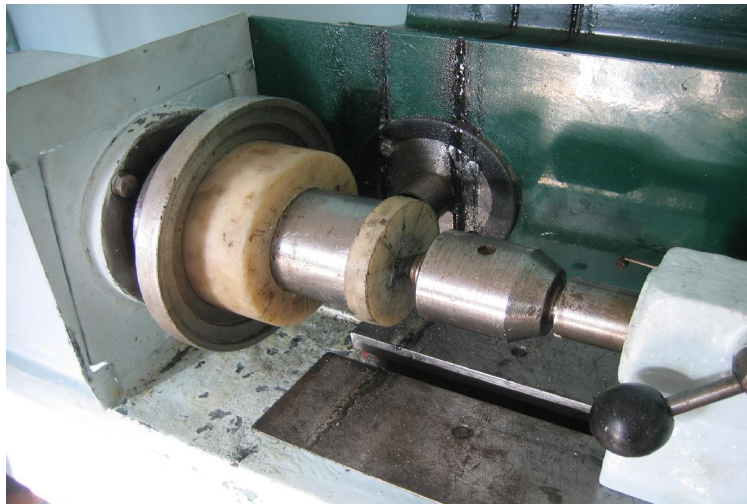


Рис. 4. Шпиндельный узел СЦФ-4 с заготовкой





На первом этапе исследований были включены следующие модельные составы: эпоксидная смола ЭД-20 (матрица), смола с фторопластом Ф-4, смола с графитом ГС-1, смола с дисульфидом молибдена  $\text{MoS}_2$ , смола с металлическими порошками (чугуна и бронзы), смола, наполненная рублеными волокнами (стекловолокном и углеграфитовым волокном), смола, армированная двумя витками тканей (стеклоткани и хлопчатобумажной).

Полученные втулки были подвергнуты всесторонним испытаниям. Определялись плотность изделий, твердость поверхностей с обеих сторон, шероховатость, точность литья, прочность материалов на растяжение и сжатие, триботехнические характеристики – коэффициент трения, интенсивность износа.

Результаты физико-механических испытаний позволили сделать ряд определенных выводов по точности управления и поддержанию термодинамических режимов, уточнить требуемые технологические параметры в зависимости от составов композиций.

Плотность образцов значительно зависит от природы наполнителей, их количества в композиции, температурных и кинематических условий формирования. Например, композиции с дисульфидом молибдена, графита и фторопласта значительно различаются по величинам плотности, полученной в сходственных термодинамических условиях, хотя наблюдается общая тенденция роста плотностей с возрастанием частоты вращения со снижением градиентов плотности при увеличении температуры формирования изделий (рис. 5).

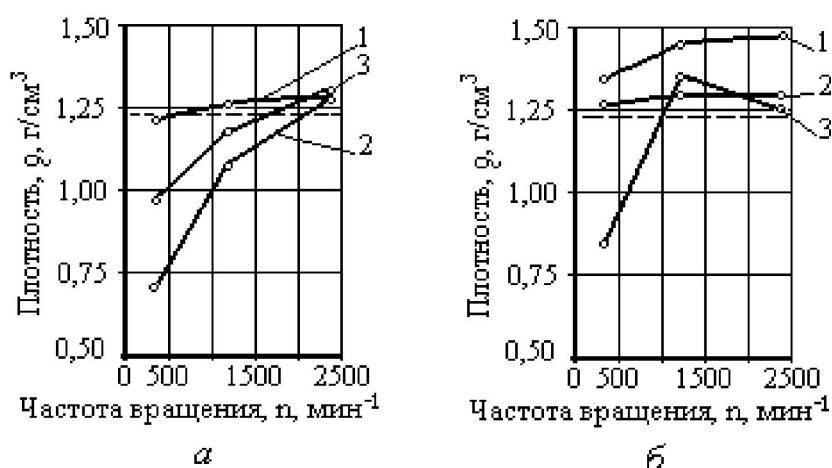


Рис. 5. Плотность модельных образцов, полученных на СЦФ-4:  
а – смесь эпоксидной смолы и графита (ЭД-20 + 10 % масс. ГС-1);  
б – смесь ЭД-20 и дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  (20 % масс.):  
1 – 30 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50 °С

Результаты исследования твердостей поверхностей модельных составов свидетельствуют о преобладающем влиянии природы наполнителей перед термодинамическими условиями центробежного формирования изделий из ПКМ.

Анализ величин твердости эпоксидфторопластовых образцов показал, что введение в состав композиции фторопласта значительно снижает уровень твердости поверхностей втулок по сравнению с уровнем твердости втулок, изготовленных в тех же термодинамических условиях из чистой эпоксидной смолы. Если для чистой эпоксидной смолы ЭД-20 твердость поверхностей достигает 232 НВ, то для модельного состава «ЭД-20 + 20 % масс. ч. Ф-4» твердость снижается максимально на внутренних поверхностях до 55–90 НВ и до 70–90 НВ на внешних поверхностях втулок.

Величина фактора разделения для этого модельного состава определяет формирование слоистой по толщине структуры материала (рис. 6). На процесс резкого перераспределения фторопласта в композиции по внешним слоям и на изменение толщины слоев существенное влияние оказывают температурный уровень формирования изделия и кинематические условия. Известно, что чистый фторопласт обладает низкой несущей способностью, что и подтвердили испытания. Композиция расслоилась, фторопласт перераспределился на внутреннюю и внешнюю поверхности, а эпоксидная смола осталась в центральном слое. С увеличением частоты вращения и ростом фактора разделения ( $K_p = 2,7; 43,4; 173,7$  – при соответствующих частотах вращения) происходит расслоение композиции и перераспределение все большего количества фторопласта во внешний слой.



Рис. 6. Внутренняя структура модельного состава «ЭД-20 + 20 % масс. ч. Ф-4», полученного при 40 °С и частотах вращения 300, 1 200, 2 400 мин<sup>-1</sup> (слева направо)



Введение в смолу 10 % масс. ч. твердых смазок – коллоидного графита ГС-1 и дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  – оказывает гораздо меньшее влияние на снижение твердостей поверхностей образцов модельных ПКМ по сравнению со смолой: по внешним поверхностям – максимум на 20 МПа, по внутренним – максимум на 50 МПа для различных условий формирования. Получены также режимы практически без снижения твердости.

Испытания на прочность образцов из ПКМ, наполненных различными элементами, позволяют сделать ряд выводов.

Прочность на растяжение самой матрицы (смола ЭД-20) составляет 31 МПа и зависит от температуры формирования изделия. С увеличением температуры, при которой формируется изделие, наблюдается рост прочности, однако, до определенных пределов. Место разрыва представляет собой ровную гладкую поверхность без видимых выступов, что характерно для однородного материала.

При добавлении в матрицу 20 % фторопласта Ф-4 происходит разупрочнение материала. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 26 МПа. Место разрыва представляет слоистую структуру, состоящую из двух слоев фторопласта по краям образца и слоя смолы в центре.

Введение 10 % графита в матрицу вызывает упрочнение, которое зависит от степени перемешивания компаунда и температуры, при которой застывает состав. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 38 МПа. Максимальная прочность данных изделий при наиболее благоприятных условиях изготовления ( $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $t = 38\text{--}42 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 30 \text{ мин}$ ) составила 37,8 МПа. Место разрыва представляет собой неровный скол, в котором присутствуют бугорки.

Использование 10 % дисульфида молибдена ДМИ-7 (ТУ 48-19-133-90) приводит к незначительному разупрочнению изделия. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 30,5 МПа. Место разрыва представляет неровный скол с просматривающимися на нем частицами дисульфида молибдена.

При использовании в качестве армирующего материала хлопчатобумажной ткани упрочнения не происходит вследствие того, что эта ткань имеет прочность, равную прочности самой матрицы. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 31 МПа.

Введение в композицию 2 % масс. ч. углеграфитовых волокон «УКН-5000» приводит к упрочнению получаемого материала, которое зависит от частоты вращения и от расположения (ориентации) волокон в изделии. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 45 МПа. Место разрыва представляет собой ровный скол с микровыступами.

Для состава с 75 % масс. ч. бронзового порошка наблюдается снижение разрушающей нагрузки. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 21 МПа. Место разрыва представляет неровный скол, в котором отчетливо просматриваются частицы бронзового порошка, не покрытые матрицей.

Для модельного состава «ЭД-20 + 2 % рубленых стекловолокон РБН-10» наблюдается существенное упрочнение. Среднее значение предельного напряжения на растяжение составляет 47 МПа, а предельные значения доходят до 55 МПа. Упрочнение зависит от частоты вращения, при которой формируется изделие. Максимум прочности получается при частоте 1 200 мин<sup>-1</sup> и уменьшается при изменении частоты вращения в обе стороны. Место разрыва представляет собой неровный скол, в котором отчетливо видны трещины, уходящие вглубь материала.

Проведенные испытания на растяжение показали целесообразность армирования материалов из ПКМ материалами, имеющими волокнистую структуру. При этом должны учитываться факторы, влияющие на качество формирования изделий, а также строго поддерживаться технологические параметры формирования изделий из ПКМ.

Следует отметить, что разработанные ранее в лаборатории композиционных материалов составы литьевых антифрикционных композиций под общей маркой ЭФЛОНГ включают сочетания различных суммарных комбинаций наполнителей, что позволило достигнуть высокой несущей способности подшипников скольжения и деталей уплотнительных систем гидроцилиндров.

Планируются дальнейшие экспериментальные исследования и математическое моделирование выявленных зависимостей с целью оптимизации технологических режимов центробежного формирования и улучшения качественных характеристик получаемых изделий.

Работа выполнена по гранту ТОГУ – тема № 04/06.