

УДК 674.08:671.892.5

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ УПРУГИХ МУФТ

В. И. ДОРОЩЕНКО<sup>1</sup>, В. М. ТКАЧЕВ<sup>2</sup>, А. И. СТОЛЯРОВ<sup>2</sup>, В. П. СЕРГИЕНКО<sup>1+</sup><sup>1</sup> Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, ул. Кирова 32а, 246050 г. Гомель, Беларусь.<sup>2</sup> Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Рассмотрены методы проектирования металлополимерных машиностроительных деталей, основанные на численном расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий с учетом физической нелинейности материала и геометрической – конструкции. Осуществлена теоретическая и экспериментальная оценка напряженного состояния упругих муфт, в том числе при циклических нагрузках. Выработаны рекомендации по изменению конструкции и подбору материалов муфт с целью повышения эксплуатационных параметров.*

### Введение

В машиностроении имеется большое количество деталей, которые несут нагрузку на 15–25 % от своей теоретической прочности, например, упругие муфты, применяемые в гидрофицированном оборудовании для соединения валов с повышенными взаимными смещениями. Материалом для муфт служит, как правило, сталь или чугун, при этом процесс изготовления их весьма трудоемок, а коэффициент использования металла составляет 0,25–0,30 [1].

Перспективным в конструкции муфт является использование полимерных композиционных материалов. Однако особенности эксплуатации муфт требуют создания конструкционных материалов с высокими демпфирующими свойствами, хорошей устойчивостью к действию динамических нагрузок и большой крутильной жесткостью. Традиционные конструкционные композиты не обладают перечисленной совокупностью свойств, вследствие чего требуются некоторые конструктивные решения, обеспечивающие работоспособность муфты в характерном спектре изменения нагрузок. Проблемой является также обеспечение присоединительных размеров муфты с заданной точностью, поскольку для полимерных композитов характерен существенный разброс параметров формостабильности. Для обеспечения сопряжения соединения типа «вал–ступица» целесообразно использовать металлический вкладыш. Однако, его наличие в конструкции полимерной муфты вследствие различия физико-механических свойств используемых материалов является источником увеличения уровня

дефектности изделий как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

В настоящей работе рассмотрены инженерные методы проектирования металлополимерных машиностроительных деталей, в частности, полимерных упругих муфт, основанные на численных методах оценки напряженно – деформированного состояния (НДС) изделия с учетом физической нелинейности материала и геометрической – конструкции.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлись муфты упругие со звездочкой 125-32-1УЗ ГОСТ 14084-93, изготовленные из разработанных в ИММС НАНБ древесно-полимерных композитов (ДПК) [2], содержащих фенолоформальдегидные смолы резольного типа (ГОСТ 901-83), древесные и волокнистые минеральные наполнители, а также органические модификаторы, и предназначенные для установки в гидрофицированное оборудование.

Прочностной анализ металлополимерной полумуфты проводили численно с использованием метода конечных элементов в два этапа: на первом – определение распределения температурных полей и остаточных напряжений в полумуфте при ее охлаждении после извлечения из пресс-формы; на втором – определение ее НДС при действии циклической эксплуатационной нагрузки. При построении модели использовали 10-ти узловой тетраэдральный конечный элемент [3].

В качестве материала металлического вкладыша выбрана сталь 45 со следующими свойствами:  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $c = 460$  Дж/(кг·К);  $\lambda =$

+ Автор, с которым следует вести переписку.

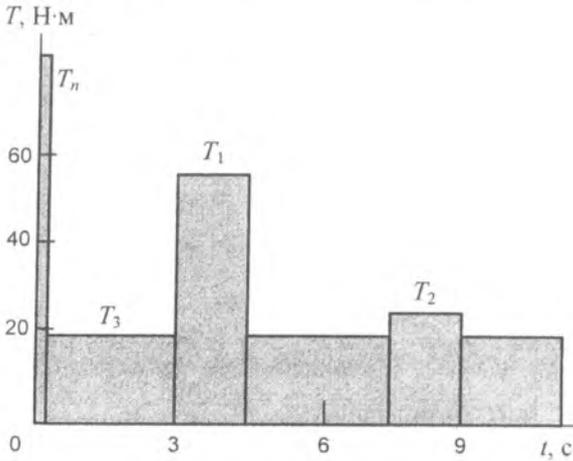


Рис. 1. Диаграмма нагружения муфты

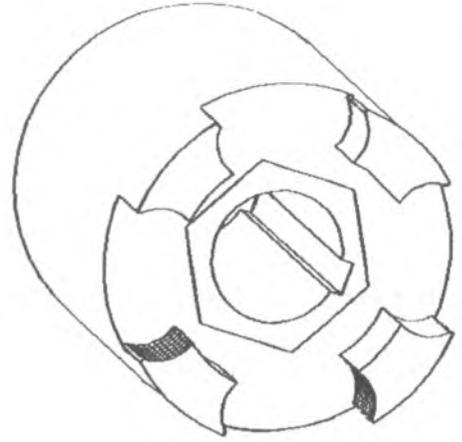


Рис. 2. Расчетная модель полумуфты

78 Вт/(м·К);  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Механические свойства композита:  $E = 13925$  МПа;  $\mu = 0,25$ ;  $c = 0,315$  Дж/(кг·К);  $\lambda = 0,255$  Вт/(м·К);  $\rho = 1350$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{изг} = 64$  МПа,  $\sigma_{сж} = 86$  МПа.

Начальные и граничные условия определены, исходя из параметров технологического процесса изготовления полумуфты, методом прямого прессования непосредственно с металлической вставкой при температуре  $T = 423$  К, выдержкой в течение  $\tau = 24$  мин и усилия прессования  $P = 380$  кН [4, 5].

Начальным условием для решения уравнения теплопроводности, описывающего нестационарный тепловой режим в трехмерном теле, являются значения температуры тела  $\theta(x, y, z)$  при  $\tau = 0$ , равной температуре переработки, коэффициент теплоотдачи  $k = 14,3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и температура окружающей среды  $\theta_{\infty} = 298$  К. Как показал расчет, остаточные напряжения в процессе охлаждения вследствие низкой теплопроводности ДПК релаксируют и в дальнейшем на прочность не оказывают влияния.

Расчет НДС производился по нагрузке, определенной на основании методики проведения ресурсных испытаний приводных муфт, используемой в ГСКТБ «Гидроаппаратура» (г. Гомель). Диаграмма нагружения муфт показана на рис. 1. Давление, действующее на рабочую поверхность кулачка, рассчитано по значениям окружных сил и среднему диаметру кулачков. В расчетах принято, что распределение давления по поверхности кулачка – равномерное. На рис. 2 показана расчетная модель полумуфты с приложенной нагрузкой.

### Стендовые испытания муфт

Для статических испытаний муфт из разработанных композиционных материалов был спроектирован и изготовлен стенд на базе унифицированной испытательной машины ZD-20. Кинематическая схема стенда представлена на рис. 3.

Испытываемые полумуфты 2, 3 закрепляются с помощью шпонки на двух валах 7 и 8. Вал 8,

расположенный в подшипниковой опоре 1, входит в зацепление с зубчатым колесом 9, а вал 7, находящийся в подшипниковой опоре 4, соединяется с рычагом 6 и жестко фиксируется специальным устройством 5.

Перемещением верхней траверсы 12 по направляющим 10 сообщают поступательное движение рейке 11, жестко прикрепленной к верхней траверсе 12 и входящей в зацепление с зубчатым колесом 9. Зубчатое колесо нагружает вал 8, на конце которого крепится полумуфта 2, соединенная через полиуретановую звездочку с полумуфтой 3. Поскольку вал 7 удерживается от поворота рычагом специального устройства 5, то создаваемый при этом крутящий момент передается непосредственно на испытываемые полумуфты. Величину, пропорциональную крутящему моменту (силу), фиксируют по шкале 13 пульта управления машины 14.

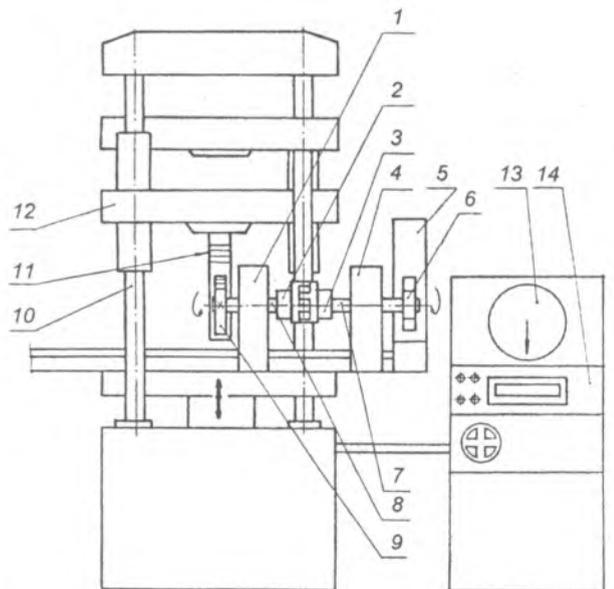


Рис. 3. Кинематическая схема для статических испытаний муфт

Результаты стендовых испытаний кулачковых муфт

Шифр ДПК	$T_{ср}$
ДПК-1	647,2
ДПК-2	710,8
ДПК-3	734,2

Результаты стендовых испытаний приведены в таблице.

Стендовые испытания позволили исследовать характер разрушения полумуфт. Так для полумуфт с шестигранной формой металлического вкладыша при медленном нагружении первоначально вблизи ребра вкладыша происходит сдвиг пресс-материала, затем перпендикулярно грани вкладыша появляется зародышевая трещина, которая по мере возрастания момента распространяется в глубь композита (рис. 4). Значение вращающего момента от зарождения трещины до полного излома возрастает на 40–60 Н·м. Такой механизм разрушения обусловлен, прежде всего, различием упругих свойств компонентов ДПК.

Полученные при стендовых испытаниях значения статического разрушающего момента для муфт в среднем в 2,5 раза выше максимального суммарного рабочего для насосных установок гидростанций, что говорит о возможности применения этих материалов для изготовления муфт с учетом действующих в них напряжений.

#### Обсуждение результатов расчета

При нагружении вращающим моментом максимальные напряжения находятся на наружной поверхности кулачка в области его сопряжения с телом полумуфты. Полученные расчетные значения напряжений для полумуфт с шестигранной формой вкладыша приведены на рис. 5а, б. Как показали расчеты, наибольшие значения напряжений наблюдаются в кулачке в период пуска и рез-

кого изменения нагрузки ( $\sigma_{экр} = 14,9$  МПа при  $T_{II} = 92$  Н·м,  $\sigma_{экр} = 9,9$  МПа при  $T_I = 57,5$  Н·м). Шестигранная форма металлического вкладыша оказывает существенное влияние на распределение напряжений в полумуфте (рис. 5б). Резкие переходы кулачков в полумуфту являются концентраторами напряжений.

Ввиду недостаточной адгезионной прочности при действии динамической нагрузки наблюдается отслоение композита от металла, что приводит к появлению дополнительных растягивающих напряжений в радиальном направлении за счет возможного проворачивания вкладыша внутри муфты ( $\sigma_x = 10,9$  МПа).

Значения максимальных напряжений в месте перехода кулачка полумуфты в ее тело создает условия для возникновения и последующего развития усталостной трещины. И, хотя полученные значения напряжений меньше предельных, возникновение трещин в процессе эксплуатации связано, по всей видимости, с низкой выносливостью используемого материала.

Вид разрушения муфты (рис. 4), полученный на испытательном лабораторном стенде, моделирующем реальные условия эксплуатации при воздействии предельных нагрузок, подтверждает результаты расчетов. Уменьшить значения действующих напряжений возможно, например, путем изменения геометрической формы металлического вкладыша.

Для определения влияния формы металлического вкладыша на напряженное состояние и работоспособность полумуфты рассмотрены дополнительно два варианта: с вкладышами круглого и шестигранного сечения со скругленными ребрами. При выполнении полумуфты с вкладышем в виде шестигранника со скругленными ребрами характер распределения напряжений подобен ис-

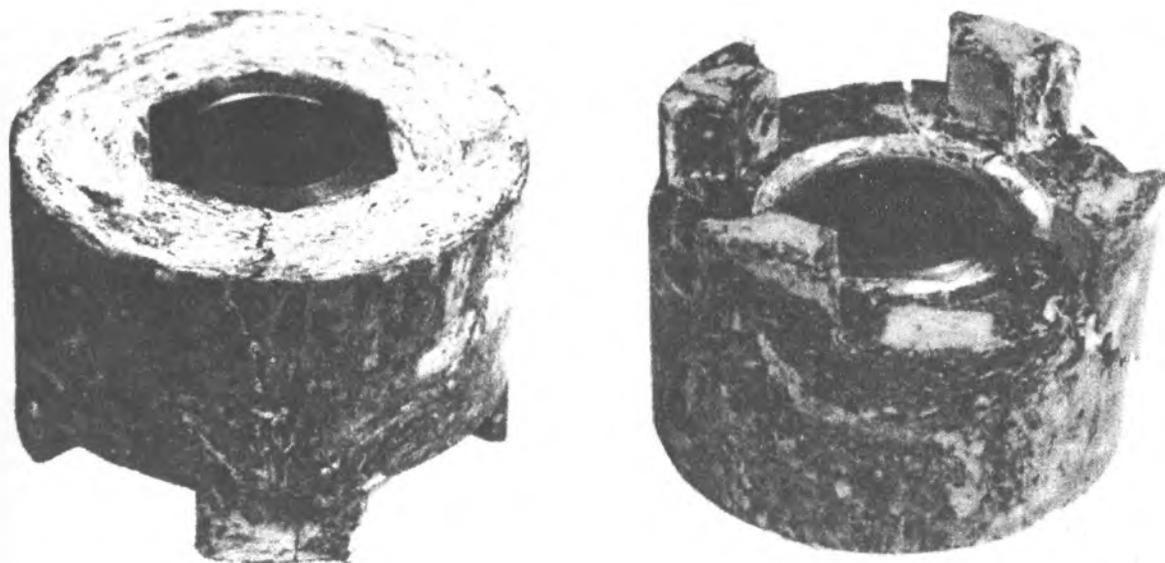


Рис. 4. Характерный вид разрушения полумуфты

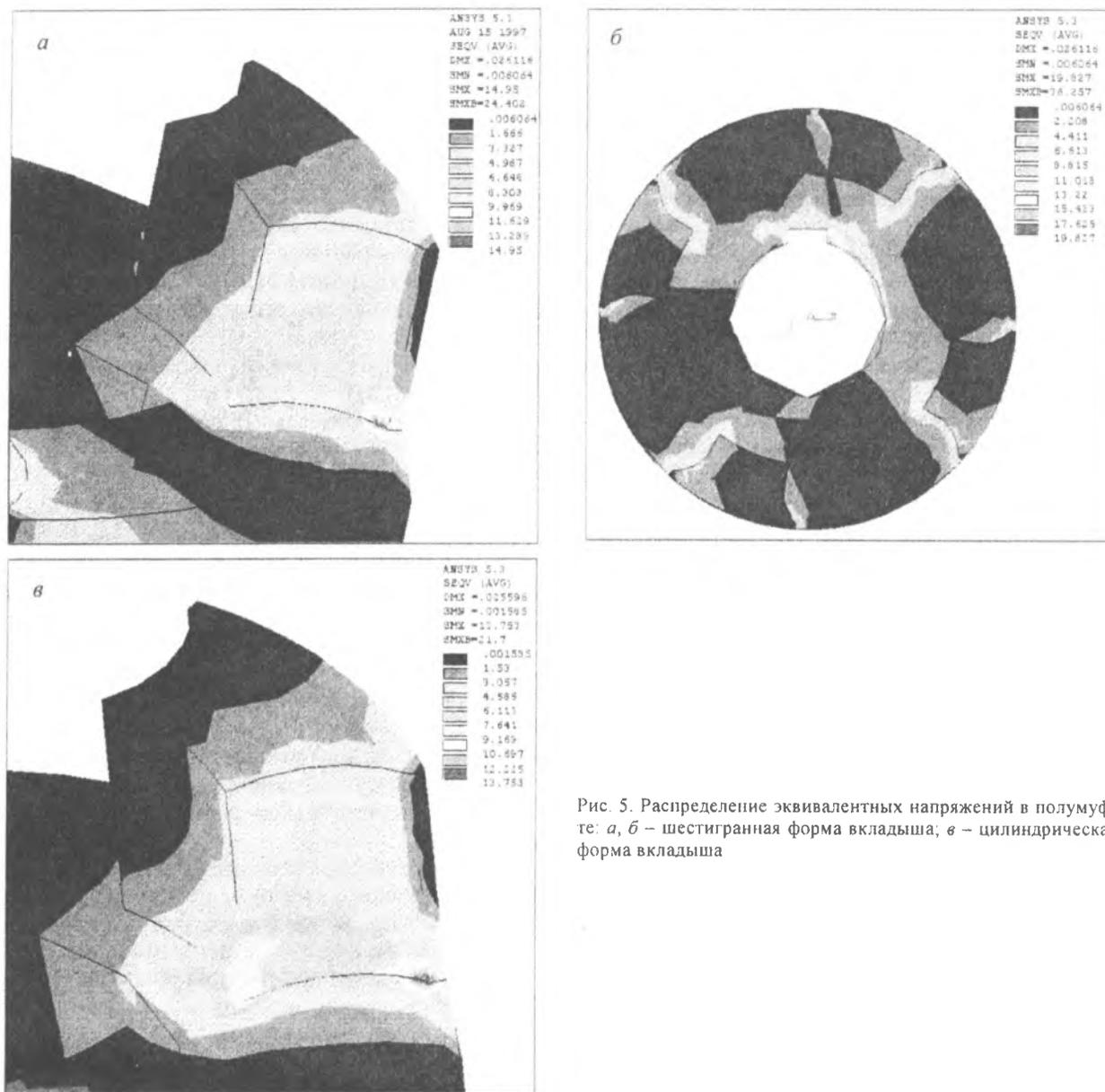


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в полумуфте: а, б – шестигранная форма вкладыша; в – цилиндрическая форма вкладыша

ходному варианту, величины напряжений изменяются незначительно: 14,9 МПа в полумуфте с шестигранным вкладышем и 14,5 МПа – у полумуфты с вкладышем с шестигранным сечением со скругленными ребрами.

Изменение формы вкладыша с шестигранным сечением на круглое приводит к существенному перераспределению напряжений в полумуфте (рис. 5в).

Анализ расчетных данных напряженного состояния полумуфт с металлическими вкладышами различной формы показал, что наиболее целесообразно в конструкции муфт использовать вкладыши цилиндрической формы с рифленой поверхностью.

#### Выводы

В результате проведенных расчетов была разработана конструкция упругих муфт и разработа-

ны рекомендации по подбору состава полимерного композита. Исследовано влияние геометрии металлических вставок и механических свойств композитов на НДС муфт при действии циклических нагрузок.

Установлено, что оптимальные прочностные характеристики муфты обеспечиваются при цилиндрическом исполнении вкладыша, при этом для улучшения адгезионной прочности системы металл–композит внешнюю контактирующую поверхность вкладыша целесообразно выполнить рифленой. Предложенные конструктивные решения, приводящие к перераспределению напряжений и разгрузке опасного сечения полумуфты, являющегося центром зарождения трещин при эксплуатации изделия, позволили повысить нагрузочную способность муфты в 2 раза.

Металлополимерные муфты, спроектированные и изготовленные с применением разработан-

ных методов, прошли широкую опытно-промышленную проверку и установлены в серийные гидростанции С100-500 ПМФ4 (ТУ2-053-1833-87).

#### Обозначения

$c$  – удельная теплоемкость материала;  $\rho$  – плотность материала;  $\theta$  – температура;  $\theta_\infty$  – температура окружающей среды;  $t$  – время нагружения;  $\tau$  – время прессования;  $\lambda$  – теплопроводность материала;  $x, y, z$  – координаты;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $T, T_n, T_1, T_2, T_3$  – вращающий момент;  $T_{cp}$  – среднее значение разрушающего момента;  $\sigma_{эkv}$  – эквивалентные напряжения;  $\sigma_x$  – нормальные напряжения

на оси  $x$ ;  $\sigma_{изг}, \sigma_{сж}$  – разрушающее напряжение при статистическом изгибе и сжатии.

#### Литература

1. Дмитриев В. А. Детали машин. Ленинград: Судостроение (1970)
2. Способ изготовления древопластика: а. с. СССР № 1692841, МКИ<sup>2</sup> В27 N 3/02. БИ (1991), № 43
3. ANSYS Elements Reference. Seventh Edition (1996), SAS IP Inc.
4. Ставров В. П., Дедюхин В. Г., Соколов А. Д. Технологические испытания реактопластов. Москва: Химия (1981)
5. Сергиенко В. П. Оптимизация температурно-временных параметров процесса прессования древесно-полимерных композиционных материалов // Известия АН БССР, сер. физ.-техн. наук (1988), № 1, 43–48

Doroschenko V. I., Tkachev V. M., Stolyarov A. I., Sergienko V. P.  
Design and calculation of elastic metal-polymer couplings.

Methods of metal-polymer machine parts designing have been considered. They are based on numerical calculation of the part' stressed-deformed state and takes into account the material non-linearity and the geometric design. Stressed state for the elastic coupling part was theoretically and experimentally estimated including cases of cyclic loading. Recommendations have been worked out concerning the design and materials for couplings to improve their performances.

Поступила в редакцию 10.02.99.

© В. И. Дорощенко, В. М. Ткачев, А. И. Столяров, В. П. Сергиенко, 1999.