

- минимальные затраты по металлу на 1 деталь 24,775 руб. по варианту №3 при норме расхода 2,352 кг.

Стремиться к высоким показателям раскроя необходимо, но это должно быть экономически целесообразно. Поэтому оптимизация сортамента для дальнейшего заказа и выбор производителя - поставщика металлопродукции будет происходить, исходя из минимизации финансовых затрат. Алгоритм расчета раскроя по новой схеме представлен на рисунке 1, б.

На заготовительных участках ХПП крупносерийного типа перерабатывается металлопрокат с годовым объемом более 50 тыс. тонн от 4...5 производителей на заготовки более 3000 наименований.

Для унификации листового сортамента, формирования монтажной нормы поставки металла и выбора оптимального варианта нужно просчитать более 10 тысяч схем раскроя в координации со всеми деталями одной группы (одной марки стали и толщины). В случае изменения производственных условий, договоров поставки металла необходимо проводить быстрый и качественный анализ раскроя (в т.ч. финансовый анализ). Выполнение ручным способом этой задачи - очень трудоемкий и небезошибочный процесс.

Поэтому, ввиду масштабности проблем, сжатых сроков, изменяющихся условий, решение этих задач возможно только автоматизированным способом с помощью специальной расчетной системы САПР.

Система позволяет:

1. Осуществлять расчет на разных стадиях производства:
  - на этапе подготовки (при формировании портфеля заказов по металлу),
  - в действующем производстве (в случае замены металла).

Правильный выбор рационального раскроя обеспечит оптимальное использование металла, получение безотходных и малоотходных способов раскроя.

2. Оптимизировать затраты по металлу.

В настоящий момент заказ листового и рулонного материала ведется исходя из определения потребности металла, имеющегося на автомобильных заводах, под габариты основных металлоемких деталей. Существующая схема проектирования технологических процессов раскроя не позволяет произвести оптимальный раскрой. Для номенклатуры деталей автомобильной продукции заказ оптимизированного сортамента следует осуществлять на базе сортамента металлургических комбинатов с минимизацией финансовых расходов. Рост цен на металл, изменение производственной ситуации потребует систематических перерасчетов меняющегося заказываемого металлопроката. Это приведет к введению на заводах изменяющихся норм расхода. Нормы расхода станут более активными, динамичными.

3. Выполнять подбор деловых отходов.

Использование отходов для изготовления более мелких деталей позволит отказаться от заказа металла на мелкие детали и тем самым повысить общий КИМ минимально на 7...10%.

4. Снизить трудоемкость технологов по расчету показателей металлоемкости.

#### Литература

1. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка/ В. Л. Марченко и др. под общ. ред. Л. И. Рудмана: М. Машиностроение, 1988. с. - 495.

#### **Триботехнические характеристики дисперсно наполненных КМ**

Печников А.А., Толешулы А., Мещеряков Е.Г.  
Карагандинский Государственный Технический Университет,  
г. Караганда, Республика Казахстан  
87015207944, [a\\_pechnikov\\_90@mail.ru](mailto:a_pechnikov_90@mail.ru)

*Аннотация.* В статье приведены результаты лабораторных испытаний дисперсно наполненных композиционных материалов. Испытания на трение и износ проводились по схемам «диск - колодка» и «вращающаяся втулка по диску». Показана высокая совместимость материалов в трибопарах КМ/сталь и их преимущества

перед парой бронза-сталь не только по значениям износа и максимальной рабочей нагрузке, но и по стабильности коэффициента трения в рабочем режиме, а также по устойчивости последнего при возрастании нагрузки. Показано, что увеличение размера и объемного содержания частиц в матрице снижает износ деталей из КМ, однако при этом увеличивается износ сопряженного контртела и коэффициент трения.

*Ключевые слова:* композиционный материал, испытания на износ и трение, фрактальные структуры

Широкое внедрение в машиностроение композиционных материалов требует проведения сравнительных испытаний различных пар трения.

В Карагандинском Государственном техническом институте эти испытания проводили по разным схемам. Для машины трения МИ-1М типа «АМСЛЕР» и СМТ-1 выбрана схема нагружения – «диск - колодка». Диски, выполненные из стали 40Х, латуни Л63 (ГОСТ 17711-93), КМ, вращаются с частотой 500 мин<sup>-1</sup> (линейная скорость - 1,31 м/с); колодки из КМ неподвижно закреплены с заданным усилием. Испытания проводили в условиях сухого трения, с ограниченной смазкой (капельным методом - 5 капель через 5 минут) и при полноценной смазке машинным маслом ТМ-3-18. Машина МТУ-01 - схема нагружения - «вращающаяся втулка по диску»; опробованы следующие варианты пар трения: КМ-сталь 45 с твердостью HRC ≥ 50; сталь 40Х - HRC ≥ 45, сталь E 52100 - 60HRC.

Для оценки фрикционной теплостойкости (ГОСТ23.210-80) испытания проводили на установке УМТ-1 по схеме осевого нагружения кольцевых образцов  $\varnothing_{нар} 28 \times \varnothing_{вн} 20 \times h 16$  мм при постоянных нагрузках от 70 до 180Н и скоростях скольжения, изменяемых в пределах от 0,38 до 1,88 м/с (300 ... 1500 мин<sup>-1</sup>) по 15 минут испытаний на каждом этапе. Втулки были изготовлены механической обработкой опытных отливок из КМ и – для сравнения – из отливок матричных сплавов, антифрикционного алюминиевого сплава АО20-1 и бронзы Бр05Ц5С5. Контртела изготавливали из стали 40Х (HRC≥45).

Все рассматриваемые КМ имеют коэффициенты трения (таблица 1), характерные для антифрикционных материалов (сплавов Бр05Ц5С5, АОМ20-1), но сохраняют их в значительно более широком диапазоне скоростей скольжения и нагрузок.

Введение в состав дисперсно наполненных КМ системы «алюминиевые сплавы – керамические частицы» графита снижает коэффициент трения и увеличивает износостойкость материала на 16 ... 25% в зависимости от состава материалов трибопары и условий трибогружения.

Рентгеновский анализ состава поверхностных слоев после испытаний трибопар КМ со сталью 40Х в режиме стабильного трения показал, что на поверхности трения всех образцов присутствует материал контртела (Fe), однако в разных концентрациях: от 1,64 до 5,11 ат.%. Различия отражают условия трибоконтакта.

Таблица 1

**Коэффициент трения КМ в паре со сталью**

Материал матрицы	Армирующий наполнитель		Условия трения
	2,5 об. % SiC	5 об. % SiC	
Д16	0,04	0,06	Машина трения МИ-1М, 3 МПа, трение со смазкой, 500 мин <sup>-1</sup>
АК12М2МгН	0,55	0,75	Машина трения УМТ-01, 0,23МПа, сухое трение, 300 мин <sup>-1</sup>

Металлографические исследования образцов КМ после трибоиспытаний показали, что уже при малых скоростях относительного перемещения трущихся тел (0,2 м/с) и малых нагрузках (70 Н) на поверхности трения в направлении скольжения формируются борозды пластического деформирования как результат абразивного действия неровностей контртела. Сдвиги наиболее заметны на неармированных образцах и менее выражены на образцах КМ, где керамические частицы, выполняя роль несущих элементов, препятствуют сдвиговой де-

формации матрицы (глубина борозд более 10 мкм с шагом между гребнями  $0,2 \pm 0,5$  мм). С другой стороны, те же твердые керамические частицы могут быть причиной переноса вещества контртела на поверхность КМ. При средних режимах нагружения на стадии установившегося изнашивания в полосах пластического деформирования образцов КМ появляются признаки структурной самоорганизации в виде ячеек размером 5–10 мкм, оконтуренных керамическими частицами размером  $\sim 1$  мкм, что может быть результатом декогезии и разрушения частиц с последующим шаржированием их в матрицу.

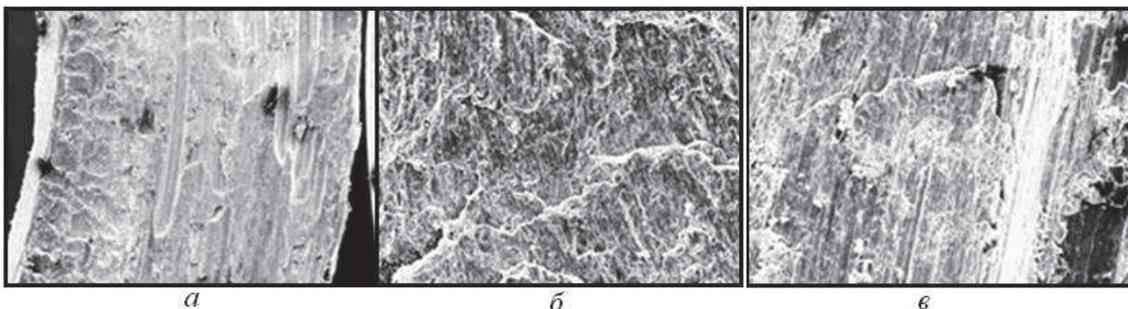
Формирование на поверхности трения такого рода фрактальных структур можно определить как устойчивое промежуточное состояние, обеспечивающее высокую износостойкость образцов КМ. Ведущий механизм изнашивания на стадии формирования таких структур - абразивный. Абразивное действие могут осуществлять продукты изнашивания – оксиды алюминия, обломки контртела, выкрошившиеся армирующие частицы.

С увеличением параметров и длительности трибонагружения ширина полос, где формируются фрактальные структуры, и размеры их фрагментов уменьшаются. Одновременно от поверхности вглубь образцов расширяется зона пластических сдвигов и поворотов. Формирование этой зоны связано с действием сил трения и появлением на поверхности трения очагов схватывания. Ее ширина в образцах КМ зависит не только от механических свойств матриц при температурах разогрева при трении, но и от дистанции между армирующими частицами: чем больше эта дистанция, тем шире зона пластических сдвигов и поворотов. На заключительной стадии стабильного трения ширина этой зоны в КМ достигает 100...150 мкм, что позволяет говорить о выходе процесса изнашивания на макромасштабный, или объемный, уровень.

Как известно, завершающей стадией разрушения поверхностей трения является микроконтактное схватывание и задир, поэтому работоспособность антифрикционного материала можно оценить по параметрам задира или фрикционной теплостойкости.

Задиростойкость КМ существенно превосходит таковую образцов из матричных сплавов и антифрикционного сплава АОМ 20-1 (20% Sn, 1% Cu, остальное - Al). Наибольшую стойкость против схватывания обнаруживают КМ на базе матричных сплавов, имеющих наиболее высокие значения предела прочности и текучести, а также КМ с полиармированием наполнителями разной природы, в том числе КМ, где интерметаллидный наполнитель получен методом реакционного литья (*in-situ*). По результатам испытаний на задир одновременное введение в матрицу керамических частиц и частиц графита смещает точку перехода "нормальный режим – схватывание" в область более высоких значений осевой нагрузки и скоростей скольжения.

Просмотр на растровом электронном микроскопе поверхности образцов (рисунок 1) после задира показывает, что армирование заметно отражается на микрорельефе очагов схватывания.



**Рисунок 1. Поверхность участков схватывания образцов: АК12 (а), АК12 + 5%SiC (б) и АК12 + 5%SiC + 5%С (в)**

В присутствии керамических частиц очаги схватывания более фрагментированы, чем на неармированных образцах, вероятно, вследствие возрастания частоты чередования процессов схватывания и разрыва адгезионных связей. Введение в КМ частиц графита повышает сопротивление схватыванию, в очагах схватывания увеличивается доля площади относительного проскальзывания трущихся тел.

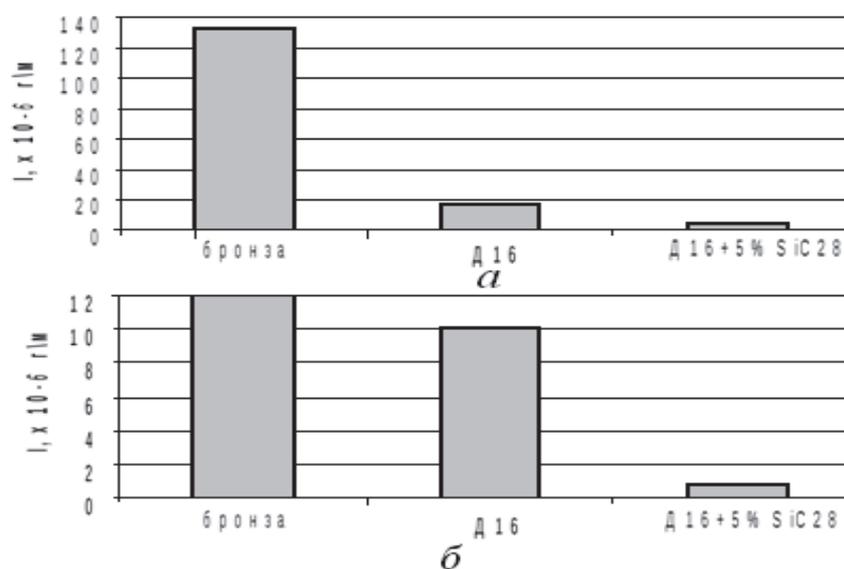
Показатели износа образцов КМ в период стабильного трения минимальны. Так, за 5 часов непрерывного трения (23580 м) при испытании на машине МИ-1М износ колодок из КМ с разными матрицами и 5% частиц SiC28 близок к нулевому значению. Результат объясняется тем, что на начальной стадии (первые 2 часа) наблюдается некоторое увеличение массы за счет налипания на колодку материала контртела (таблица 2).

Таблица 2.

**Изменение массы колодок из КМ (г) за два часа и пять часов трения со смазкой при нагрузке 1 МПа на машине трения МИ-1М**

Материал	$m_H$	$m_{2 \text{ часа}}$	$m_H - m_{2 \text{ часа}}$	$m_{5 \text{ часов}}$	$m_H - m_{5 \text{ часов}}$
АМг-1+5SiC28	4,3116	4,3128	-0,0012	4,3110	0,0006
Д16+5SiC28	4,6281	4,6298	-0,0017	4,6276	0,0005
АК12+5SiC28	4,3290	4,3308	-0,0018	4,3287	0,0003

Даже малая добавка частиц SiC значительно повышает износостойкость КМ по сравнению с матричными сплавами: при трении со смазкой интенсивность изнашивания образцов КМ на базе сплава Д16 примерно на порядок меньше, чем у матрицы; при трении без смазки при удельной нагрузке 0,7 МПа соответствующие интенсивности изнашивания различаются в 2,5 раза и на порядок меньше, чем таковая у бронзы (рисунок 2).



**Рисунок 2. Интенсивность изнашивания колодок в паре со сталью 40Х при трении на машине МИ-1М: а - сухое трение, нагрузка 0,7 МПа, б - трение со смазкой, нагрузка 4,0 МПа**

Низкая интенсивность изнашивания обнаружена также на образцах КМ с матрицей АК12, что может быть связано с наличием в сплаве АК12 кристаллов первичного и эвтектического кремния, выполняющих роль дополнительных армирующих элементов.

Образцы КМ с матрицей АМГ1 изнашивались более интенсивно, чем с матрицей АК12, однако после проведения термообработки по оптимальному режиму (закалка в горячую воду от 500...550°C, повторный нагрев 140°C, 40 мин) достигнуто некоторое повышение износостойкости. Испытания проводили на машине трения СМТ-1 с контртелом из стали 40Х (HRC  $\geq 45$ ) в условиях сухого трения при нагрузке 1,6 МПа. Здесь же приведены значения внутренних напряжений после трибоиспытаний, измерения на рентгеновской установке ДРОН-3, с усреднением для площади поверхности в 3 мм<sup>2</sup>, диапазон измерения в глубину от 0,1 до 100 мкм.

Испытания на трение и износ изотропных КМ системы «алюминиевые сплавы – керамические частицы» показали высокую совместимость материалов в трибопарах КМ/сталь и их преимущества перед парой бронза-сталь не только по значениям износа и максимальной рабочей нагрузки, но и по стабильности коэффициента трения в рабочем режиме, а также устойчивости последнего при возрастании нагрузки.

Оптимальным решением для повышения износостойкости пар трения является полиармирование КМ. Так, введение в КМ состава АК12+5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(40) и АК12+5%SiC(28) графита в количестве не более 5 об.% способствует снижению коэффициента трения, повышает износостойкость и долговечность узла трения. При этом улучшается обрабатываемость материала, следовательно, могут быть снижены затраты на оснастку и инструмент при изготовлении деталей узла. Графитовый наполнитель, являясь сухой смазкой, обеспечивает создание на поверхности контакта дополнительной защитной пленки, что позволяет использовать пару КМ по КМ в реальных узлах трения.

Результаты испытаний КМ на трение и износ показывают, что целенаправленное регулирование триботехнических свойств КМ может быть достигнуто за счет выбора матричных сплавов с различным уровнем прочности и пластичности; введения в матрицу наполнителей различной природы, объемного содержания и размера; последующей термической или термомеханической обработки КМ. Ограничения по количеству армирующей фазы в КМ для условий трибоконтакта КМ/сталь определяет интенсивный износ контртела, соответствующий объемному содержанию частиц карбида кремния в 13-15%.

Армирование матриц высокопрочными, высокомодульными частицами керамики способствует увеличению несущей способности, расширению интервала трибоагрузки по допустимым скоростям скольжения, температурам в трибоконтакте; увеличению стойкости против схватывания. Все рассматриваемые КМ имеют коэффициенты трения, характерные для антифрикционных материалов (сплавов Бр05Ц5С5, АОМ20-1), но сохраняют их в значительно более широком диапазоне скоростей скольжения и нагрузок.

Формирование на поверхности трения фрактальных структур определяет устойчивое промежуточное состояние, обеспечивающее высокую износостойкость образцов КМ. Ведущий механизм изнашивания на стадии формирования таких структур - абразивный. Абразивное действие могут осуществлять продукты изнашивания – оксиды алюминия, обломки контртела, выкрошившиеся армирующие частицы.

Задиростойкость КМ существенно превосходит таковую образцов из матричных сплавов и антифрикционного сплава АОМ 20-1 (20% Sn, 1% Cu, остальное - Al). Наибольшую стойкость против схватывания обнаруживают КМ на базе матричных сплавов, имеющих наиболее высокие значения предела прочности и текучести, а также КМ с полиармированием наполнителями разной природы, в том числе КМ, где интерметаллидный наполнитель получен методом реакционного литья (in-situ).

Натурные испытания на трение и износ изотропных КМ системы «алюминиевые сплавы – частицы керамики» показали высокую совместимость материалов в трибопарах КМ/сталь и их преимущества перед парой бронза-сталь не только по значениям износа и максимальной рабочей нагрузке, но и по стабильности коэффициента трения в рабочем режиме, а также по устойчивости последнего при возрастании нагрузки. Показано, что увеличение размера и объемного содержания частиц в матрице снижает износ деталей из КМ, однако при этом увеличивается износ сопряженного контртела и коэффициент трения. Показана необходимость оптимизации объемного содержания частиц в КМ по условиям эксплуатации. Впервые экспериментально подтверждена возможность применения литых КМ системы алюминиевые сплавы - частицы керамики в узлах трения механизмов и машин в паре со сталью в условиях с ограниченной смазкой и в паре КМ-КМ при трении со смазкой.

#### Литература

1. Получение алюмоматричных дисперсно-упрочненных композиционных материалов/ Курганова Ю.А., Чернышова Т.А., Курганов С.В. М., Металлургия машиностроения, изд. Литейное производство, 2010, №2.- с. 38-40
2. Чернышова Т. А., Калашников И. Е., Болотова Л. К. Трибологические свойства литых алюмоматричных композитов, модифицированных нанопорошками. Металлургия машиностроения 2010, №2.- с. 21 – 26.