

## АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И МЕДЬСОДЕРЖАЩЕЙ МАТРИЧНОЙ СВЯЗКИ

### Введение

Композиционные материалы на основе порошков карбида вольфрама и медьсодержащей матричной связки [1] применяются для изготовления контактных деталей узлов машин, работающих в условиях абразивного трения. Наличие абразивных частиц в рабочих средах, являющихся смазкой узла трения, приводит к интенсивному износу трущихся деталей и выходу машины из строя. Это обстоятельство выдвигает определенные требования к выбору материалов узлов трения в отношении их износостойкости, надежности и долговечности.

В узлах трения машин абразивное изнашивание происходит либо вследствие трения о свободные частицы, либо при трении о закрепленные абразивные частицы. Это зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются соотношения твердостей материалов трущихся деталей и абразивных частиц, и условий их взаимодействия. Если абразивные частицы имеют твердость более высокую, чем твердость одной из контактных поверхностей пары трения, то они внедряются в более мягкую поверхность одной из деталей, и в процессе работы узла изнашивают более твердую поверхность второй детали. В дано случае происходит изнашивание детали при трении о закрепленные абразивные частицы. Это позволяет сделать выбор метода испытания композиционных материалов, основанного на моделировании изнашивания о закрепленные абразивные частицы, так как он воспроизводит типовой процесс абразивного изнашивания.

### 1. Стенд для испытания материалов на относительную износостойкость

Для проведения испытаний был разработан и изготовлен стенд, воспроизводящий схему изнашивания о закрепленные абразивные частицы. Стенд представляет собой машину трения, в которой пальчиковые образцы трутся о торцовый диск с абразивной подложкой [2].

На рисунке 1 представлена схема стенда. Стенд состоит из плиты 1, корпуса 2, электродвигателя главного движения 3, связанного через блоки сменных шкивов 4, 5 ременной передачей 6 с валом 7, столика 8, на котором крепится шайба 9 и контртело 10, защитного кожуха 11 со сливным штуцером 12, электродвигателя движения подачи 13, связанного через редуктор 14 и винтовую передачу 15 с кареткой 16, на которой закреплена штанга 17, с балкой 18, обоймой для пружин 19, с пальцем 20 и регулировочным винтом 21, индикатором часового типа 22, поворотной стойки 23, соединенной шарнирно через плечи 24 с образцедержателем 25, имеющим опорный ролик 26 и набор грузов 27.

Стенд работает следующим образом. От электродвигателя главного движения 3 через блоки сменных шкивов 4, 5, ременную передачу 6, вал 7 с закрепленным на нем столиком 8, на контртело 10 передается вращение. Шайба 9 устанавливается в целях повышения безопасности под абразивные круги диаметром 250-300 мм. От электродвигателя движения подачи 13 через редуктор 14 и винтовую передачу 15 на каретку 16 передается поступательное движение. Каретка 16 движется

по специальному направляющим, предотвращающим перекокс и заедание при движении. Жестко закрепленная на каретке 16 поворотная стойка 23 связана через шарнирнозакрепленные плечи 24 с образцедержателем 25, вследствие чего ему также сообщается поступательное движение.

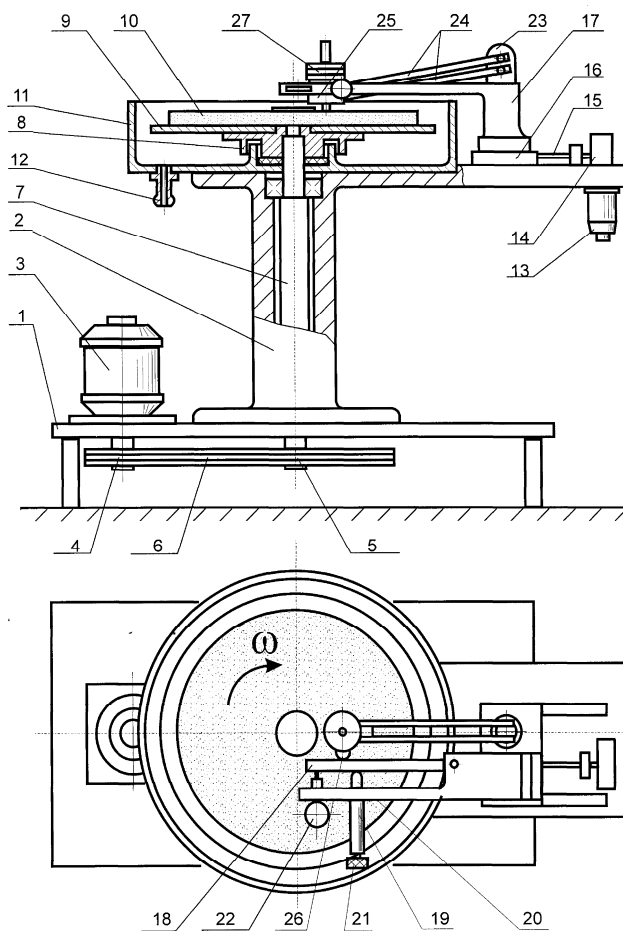


Рис. 1. Стенд для испытания материалов на трение и износ.

Шарнирное крепление плечей 24 к образцедержателю 25 и к поворотной стойке 23 позволяет образцедержателю 25 свободно перемещаться в вертикальной плоскости. Оси шарниров на образцедержателе 25 и на поворотной стойке 23 при этом расположены параллельно в вертикальной плоскости. Такое расположение шарниров обеспечивает параллельность контактных поверхностей испытуемого образца и контртела 10 при вертикальных перемещениях образцедержателя 25. Таким образом, достигается постоянный контакт испытуемого образца и контртела 10 при возможных торцовых биениях контртела 10 и в процессе изнашивания поверхностей трения. Поворотная стойка 23, выполненная в виде ступенчатого вала, помещенного одним концом на радиально-упорных под-

шипниках в специальный корпус, дает возможность связанному с ней через шарнирнозакрепленные плечи 24 образцедержателю 25 совершать поворот вокруг ее вертикальной оси. Такое соединение образцедержателя 25 с кареткой 16 позволяет ему совершать поступательное движение параллельно одной из горизонтальных осей контртела 10 при возможности свободно перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Набор грузов 27 обеспечивает вертикально действующую силу, которая создает определенное давление на контактных поверхностях испытуемого образца и контртела 10. Вследствие взаимодействия испытуемого образца и вращающегося в определенном направлении контртела 10, образцедержатель 25 поворачивается вокруг вертикальной оси поворотной стойки 23 в направлении действия силы трения. При этом образцедержатель 25 через опорный ролик 26 взаимодействует с балкой 18, вызывая ее поворот вокруг оси закрепления. Поворот балки 18 ограничен противодействием пружины, помещенной в обойму 19, жестко закрепленную на штанге 17 и связанную с пальцем 20, который контактирует с балкой 18 и может перемещаться по внутренней цилиндрической поверхности обоймы 19. Жесткость пружины регулируется при помощи регулировочного винта 21, и устанавливается в зависимости от силового взаимодействия между испытуемым образцом и контртелом 10 так, чтобы перемещение испытуемого образца составляло примерно 25% от величины его диаметра. В этом случае направление действия силы трения скольжения можно считать совпадающим с направлением перемещения испытуемого образца. Поворот свободного конца балки 18 фиксируется при помощи индикатора часового типа 22, закрепленного на штанге 17 и протарированного в единицах силы. Тарировку индикатора 22 легко произвести при помощи динамометра, который через предусмотренное в штанге 17 отверстие соединяется с балкой 18 напротив ролика 26. Для уточнения значения силы трения скольжения между испытуемым образцом и контрообразцом 10 вводится поправочный коэффициент, учитывающий противодействие подшипников поворотной стойки 23 и шарнира балки 18. Поступательное перемещение испытуемого образца задается при помощи регулируемых концевых выключателей, которые размещены на направляющих каретки 16, и может происходить в режиме реверса с различной продолжительностью одного цикла. Движение испытуемого образца по всему диаметру контртела 10 предотвращает его засаливание и образование в нем канавки. Счетчик количества оборотов позволяет определить путь трения испытуемого образца.

Таким образом, стенд дает возможность проводить испытания разнообразных пар трения при различных скоростях скольжения, различном давлении на поверхности трения, при фиксированном пути трения, с охлаждением и без охлаждения, а также позволяет определять силовое взаимодействие между испытуемым образцом и контртелом.

## 2. Методика проведения испытаний

Испытания материалов на износ в условиях абразивного трения проводились с учетом изменения удельного нагружения образцов, скорости скольжения, пути трения, времени испытания, смазочной среды, типа абразивной подложки. Опытные образцы изготавливались в виде цилиндра высотой 25 мм, на торцовую поверхность которого наносился износостойкий слой из композиционного материала. Площадь контактной поверхности образцов составляла 1 см<sup>2</sup>. При проведении испытаний образцов на изнашивание при трении по закрепленному абразиву, удельная нагрузка на контакте достигала 0,6 МПа, время проведения испытания – не более 4 минут.

Скорость скольжения оказывает влияние на интенсивность процессов абразивного изнашивания. С увеличением скорости скольжения интенсивность изнашивания возрастает. Это объясняется влиянием теплового фактора. С возрастанием температуры на контакте изменяется и сам характер износа. С учетом

этого, испытания проводились при скорости скольжения не более 1 м/с. Поэтому, принятая величина нагрузки на контактной поверхности испытуемого образца, скорость его скольжения и время проведения испытания обоснованы необходимостью снижения температурного влияния на величину износа. В качестве эталона принят образец из стали 45 после термообработки. В качестве абразивной подложки принят шлифовальный круг прямого профиля из карбида кремния зеленого (КЗ) с микротвердостью 320 МПа и зернистостью 0,07 мм. Выбор карбида кремния зеленого (КЗ) в качестве абразивного материала обоснован тем, что для того, чтобы происходил процесс абразивного изнашивания, твердость абразива ( $H_a$ ) должна быть выше твердости материала образца ( $H_m$ ) в 1,4 раза и более. Износ образцов оценивался по потере массы на аналитических весах с точностью 0,0002 г. Оценка износа в сравнении с эталоном выражалась относительной износостойкостью. Результаты испытаний обрабатывались с применением методов математической статистики.

## 3. Испытания композиционных материалов на основе порошков карбида вольфрама и медьсодержащей матричной связки

Испытуемые образцы получали путем напекания износостойкого материала на торцовую поверхность стального цилиндрика под слоем флюса в электропечи. При испытании исследовалось влияние гранулометрического и фракционного состава шихты на основе порошков карбида вольфрама, нагрузки прессования, а также состава медьсодержащей матричной связки.

При исследовании гранулометрического состава использовались смеси зернового карбида вольфрама – релита, и тонкозернистого порошка карбидовольфрамокобальтовой смеси ВК-6. Получена зависимость относительной износостойкости

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{эталона}}}{I_{\text{образца}}}$$

(рисунок 2).

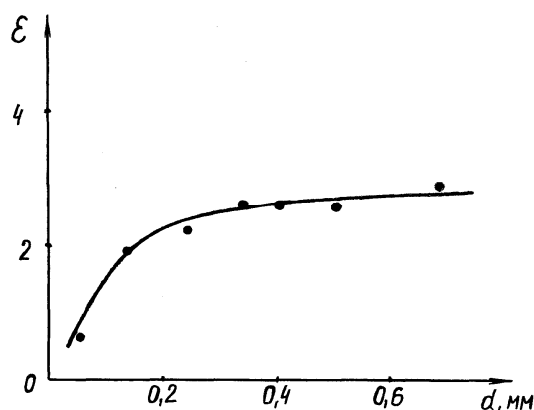


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости композиционного материала от зернистости релита.

Из рисунка видно, что с увеличением зерен наполнителя шихты, износостойкость образцов возрастает. При введении в состав шихты релита зернистостью более 0,45 мм, существенного роста износостойкости образцов не отмечалось. Износ вследствие режущего действия абразивных частиц происходит в основном по более пластичной матрице композита. При этом в образцах, состоящих только из мелкозернистого порошка карбида вольфрама и матричной связки, наблюдалось более интенсивное изнашивание, чем в образцах, содержащих релит. Это объясняется тем, что некоторые мелкие зерна карбида вольфрама, в случае их слабого сплавления, срезались абрази-

вом контртела вместе с околозёрненной частью мягкой матрицы. Проведенные опыты показали, что более тугоплавкая матричная связка обеспечивает более прочное сцепление при спекании порошковых компонентов шихты.

Введение в состав шихты вместе с крупнозернистым релитом частиц карбидов мелкой фракции (0,5...10 мкм) обеспечивает более плотную укладку зерен при прессовании композита, а с увеличением плотности укладки зерен твердой карбидной фракции повышается сопротивляемость композита абразивному изнашиванию (рисунок 3). При введении в шихту мелкой фракции тонкодисперсного порошка ВК-6, износостойкость композита повышается в среднем в 1,5...2 раза. Наилучшую относительную износостойкость при стендовых испытаниях показали образцы с исходным содержанием в шихте порошка ВК-6 приблизительно 30%.

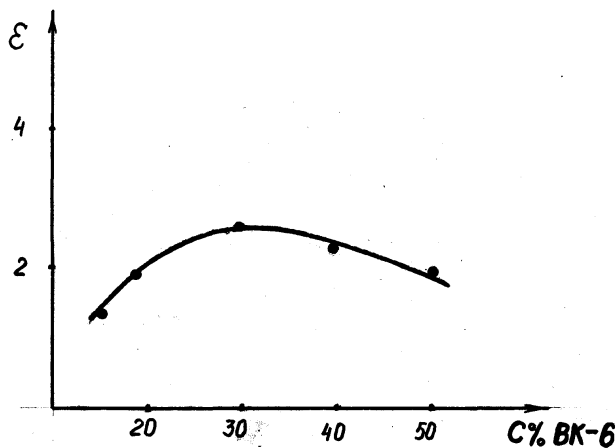


Рис. 3. Зависимость относительной износостойкости композиционного материала от содержания ВК-6 в шихте.

Прессование шихты в торцовое цилиндрическое углубление стального образца осуществлялось с помощью гидравлического пресса. С увеличением нагрузки плотность спрессованного слоя шихты увеличивается, однако, как показали опыты, при увеличении нагрузки прессования более 150 МПа, значительного увеличения плотности спрессованного слоя шихты не отмечалось (рисунок 4).

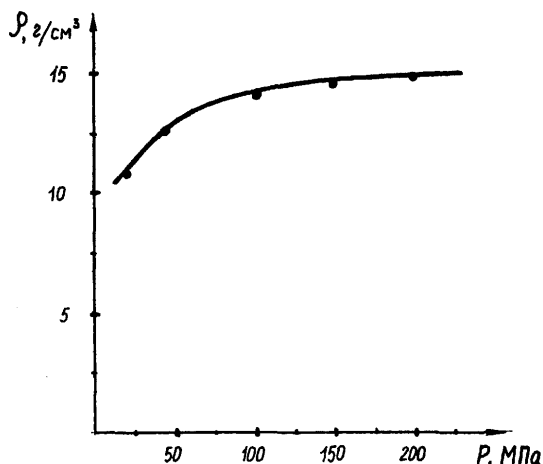


Рис. 4. Зависимость плотности спрессованного слоя шихты от давления прессования.

Как отмечалось, износостойкость композита существенно зависит от состава матричной связки. В связи с этим, были проведены исследования характера влияния на износостойкость композита таких пропиточных сплавов, как медь-никель, медь-никель-бор, медь-никель-марганец, медь-никель-бор-кремний. Составы данных пропиточных сплавов

определялись методом математического планирования эксперимента [3]. Для этого было изготовлено по шесть пропиточных сплавов каждого состава, и на их основе спекались образцы композита. При этом, состав шихты оставался постоянным в соотношении 70% релит и 30% – ВК-6.

Для системы Cu-Ni-B-Si основной уровень и интервалы варьирования составляли следующие значения (таблица 1).

Таблица 1. Основной уровень и показатели варьирования для системы Cu-Ni-B-Si

Показатели	X <sub>1</sub> Ni	X <sub>2</sub> B	X <sub>3</sub> Si	Cu
Основной уровень	35	0,8	2,5	Остальное
Интервалы варьирования	10	0,5	1,0	Остальное
Верхний уровень	45	1,3	3,5	Остальное
Нижний уровень	25	0,3	1,5	Остальное

Для системы Cu-Ni-Mn основной уровень и интервалы варьирования составляли следующие значения (таблица 2).

Таблица 2. Основной уровень и показатели варьирования для системы Cu-Ni-Mn

Показатели	X <sub>1</sub> Ni	X <sub>3</sub> Mn	Cu
Основной уровень	30	10	Остальное
Интервалы варьирования	10	5	Остальное
Верхний уровень	40	15	Остальное
Нижний уровень	20	5	Остальное

Для системы Cu-Ni-B основной уровень и интервалы варьирования составляли следующие значения (таблица 3).

Таблица 3. Основной уровень и показатели варьирования для системы Cu-Ni-B

Показатели	X <sub>1</sub> Ni	X <sub>3</sub> B	Cu
Основной уровень	15	1,0	Остальное
Интервалы варьирования	5	0,5	Остальное
Верхний уровень	20	1,5	Остальное
Нижний уровень	10	0,5	Остальное

Химический анализ полученных сплавов показывает, что из рассмотренных систем наибольшее соответствие планируемых и реальных составов пропиточных сплавов наблюдается для системы Cu-Ni-Mn. Для остальных систем разброс в значениях составляет 20-30%, поэтому планирование эксперимента проводим для системы Cu-Ni-Mn.

В качестве параметра оптимизации “y” была выбрана относительная износостойкость композита при трении об абразивную подложку. Составлена матрица плана – полный факторный эксперимент 2<sup>2</sup> (таблица 4).

Коэффициенты регрессии определены по методу наименьших квадратов (МНК): b<sub>0</sub>=2,74; b<sub>1</sub>=0,135; b<sub>2</sub>=0,140; b<sub>1,2</sub>=0,165. Уравнение регрессии при этом будет иметь вид: y=2,74+0,135X<sub>1</sub>+0,14X<sub>2</sub>+0,165X<sub>1,2</sub>.

Для последующей оценки линейности уравнения регрессии, пятикратно определен выход y<sub>0</sub> при значениях факторов на нулевом уровне, т. е., в центре эксперимента. Определение среднего значения параметра оптимизации в каждой точке плана выполнялось по шести параллельным опытам. Определена дисперсия каждого опыта и подтверждена её однородность по критерию Кохрена [4]

$$G_{расч.} = \frac{0,1179}{0,2626} = 0,4489 \leq G_{табл.} = 0,584,$$

$$\text{при } f_1=5, f_2=4.$$

Вычислена дисперсия воспроизводимости и ошибка всего эксперимента:

Таблица 4. Матрица планирования 2<sup>2</sup> полного факторного эксперимента.

Номер опыта	Шифр образца	Факторы				Параметры оптимизации						$\bar{Y}$
		X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	
1	2.1	+1	-1	-1	+1	2,35	2,48	2,91	2,63	2,76	2,67	2,63
2	2.2	+1	+1	-1	-1	2,04	2,40	2,81	2,93	2,68	2,60	2,57
3	2.3	+1	-1	+1	-1	2,28	2,33	2,80	2,68	2,79	2,80	2,58
4	2.4	+1	+1	+1	+1	2,82	3,21	3,51	3,05	3,30	3,20	3,18

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 = 0,0656,$$

$$S_y = \sqrt{S_y^2} = 0,256.$$

На основании полученных результатов и анализа уравнения регрессии можно отметить следующее.

С увеличением содержания никеля и марганца в составе пропитки, износостойкость композита будет повышаться, при этом, влияние никеля и марганца на изменение износостойкости примерно одинаково. Наряду с линейным эффектом, значительным оказался эффект взаимодействия X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>. Анализ уравнения регрессии позволил выявить область оптимума вблизи нулевого уровня, и с достаточной для практики точностью можно принять как оптимальный состав пропиточного сплава со следующим содержанием компонентов: 60%Cu-30%Ni-10% Mn.

Гистограмма относительной износостойкости композиционных материалов, пропитанных указанным матричным сплавом, приведена на рисунке 5.

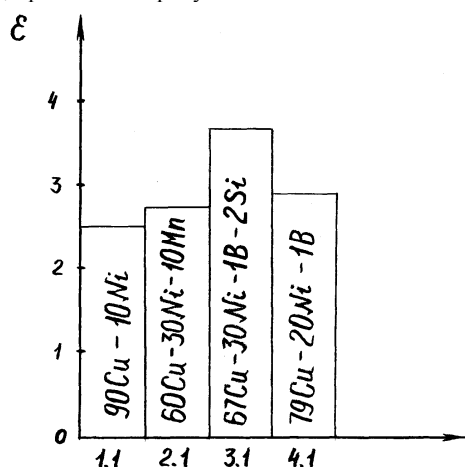


Рис. 5. Относительная износостойкость образцов композита в зависимости от состава пропитки.

УДК 620.178.16:620.178.3

Богданович А.В.

## КРИТЕРИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ СИСТЕМ И ЕГО АНАЛИЗ

В элементах силовых систем машин при их эксплуатации, как известно [1-3], развиваются комплексные износоусталостные повреждения. Поэтому при проектировании таких систем, прогнозировании их ресурса, оценке технического состояния должны использоваться критерии, учитывающие сложное взаимодействие различных по природе повреждающих явлений, приводящих к износоусталостному повреждению. В настоящей работе дается анализ одного из таких кри-

териев, построенного на основе энергетического подхода, как наиболее общего и универсального. При разработке критерия были приняты следующие основные допущения:

### Выводы

1. Разработана методика получения износостойкого композиционного материала под слоем флюса.
2. Разработана методика испытаний композиционного материала на трение и износ, спроектирован и изготовлен стенд для испытания материалов на трение и износ.
3. Разработана математическая модель планирования 2<sup>2</sup> полного факторного эксперимента по оптимизации состава композиционного материала. Расчетным путем определен оптимальный состав композита.
4. Проведены стендовые испытания образцов композиционного материала на трение и износ. Получены зависимости относительной износостойкости композита от ряда факторов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голуб М. В. Износостойкие композиционные материалы на основе порошков карбида вольфрама, меди и никеля. – Вопросы безизносности и триботехнологии №1, Москва, 1994, с. 24-39.
2. Кудрицкий Я. В., Голуб М. В. Патент РБ №3423 от 17.02.2000 г. “Стенд для испытания материалов на трение и износ”.
3. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980, 228 с.
4. Герасимович А. И. Математическая статистика. Мню Высшэйшая школа, 1983, 279 с.

Богданович Александр Вальдемарович, к.т.н, преподаватель Лидского технического колледжа УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы».

Беларусь, 231300, Гродненская обл., г. Лида, ул. Дубровенская, 4.