

**РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ
ПОРОШКОВОЙ СИСТЕМЫ
«МЕДЬ–ОМЕДНЕННЫЙ ПОЛИМЕР–
УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ»**

В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун

Университет гражданской защиты, г. Минск

Разработка и применение самосмазывающихся композиционных материалов триботехнического назначения, содержащих в своем составе твердые смазки в виде дисперсных полимеров и наноструктур углерода, позволяет решить многочисленные проблемы, связанные с применением широко используемых жидких и пластичных смазок. Использование меди в качестве матрицы обеспечивает высокую теплопроводность и способствует эффективному отводу тепла из зоны трения сопрягаемых деталей. При этом среди полимерных материалов, получивших распространение в промышленности, политетрафторэтилен (ПТФЭ) имеет самый низкий коэффициент трения, что обуславливает его широкое применение в машиностроении. Высокие физико-механические и триботехнические свойства углеродных нанотрубок (УНТ) указывают на перспективность их применения в качестве антифрикционных и упрочняющих добавок композиционных материалов для узлов трения.

Однако непосредственное введение дисперсных полимеров и наноструктур углерода в металлическую матрицу путем применения известных классических методов консолидации исходных компонентов осложнено вследствие

невысокой температуры термоокислительной деструкции полимеров, а также возможной графитизации наноструктур углерода, сопровождающейся потерей их высоких прочностных свойств и триботехнических характеристик при температуре спекания металлической матрицы. Использование метода электроконтактного спекания позволяет решить указанную проблему. Данный метод консолидации исходных компонентов композиционных материалов относится к разряду высокоэнергетических, что обеспечивает высокие скорости процесса спекания, при котором термоокислительная деструкция дисперсных полимеров практически не развивается. При этом величины таких параметров технологического процесса спекания, как плотность тока, приложенное внешнее давление и время воздействия электрическим током оказывают значительное влияние на структуру и свойства получаемых материалов [1–5].

Таким образом, задача состояла в разработке регрессионной модели процесса электроконтактного спекания порошковой системы «медь–омедненный ПТФЭ–УНТ». Для оценки влияния ее режимов на процессы их трения и изнашивания, а также прочностные свойства, использован статистический метод планирования многофакторного эксперимента [6, 7]. В качестве исследуемых функций отклика были выбраны триботехнические и прочностные характеристики композитов: интенсивность изнашивания I , коэффициент трения f , модуль Юнга E и предел прочности при сжатии σ . В качестве варьируемых факторов были определены параметры технологического процесса электроконтактного спекания металлополимерных композитов, содержащих в своем составе наноструктуры углерода: давление прессования P , плотность тока спекания J , время воздействия электрическим током t .

$$I = 1,418 - 0,00048P - 0,0043J - \\ -0,59t + 0,0000065J^2 + 0,18t^2,$$

$$f = 0,456 - 0,00019P - 0,0013J - 0,028t + 0,0000019J^2,$$

$$\sigma = -410,077 + 1,307P + 1,126J + 209,106t - \\ -0,0019P^2 - 0,0016J^2 - 75,996t^2,$$

$$E = -99,649 + 0,386P + 0,322J + 45,182t - 0,00054P^2 - \\ -0,00052J^2 - 22,14t^2 + 0,073Jt.$$

Представленные уравнения позволяют определить интенсивность изнашивания, коэффициент трения, предел прочности при сжатии и модуль Юнга металлополимерных композиционных материалов на основе порошковой системы «медь–омедненный ПТФЭ–УНТ» при любых значениях давления прессования, плотности тока спекания и времени воздействия электрическим током. На рис. 1–4 представлены квадратичные поверхности интенсивности изнашивания, коэффициента трения, модуля Юнга и предела прочности при сжатии образцов композиционных порошковых металлополимерных композитов, модифицированных наноструктурами углерода. Использование вычисленных графиков позволяет установить значения интенсивности изнашивания I , коэффициента трения f , модуля Юнга E и предела прочности при сжатии σ при различных значениях давления прессования P , плотности тока спекания J и времени воздействия электрическим током t .

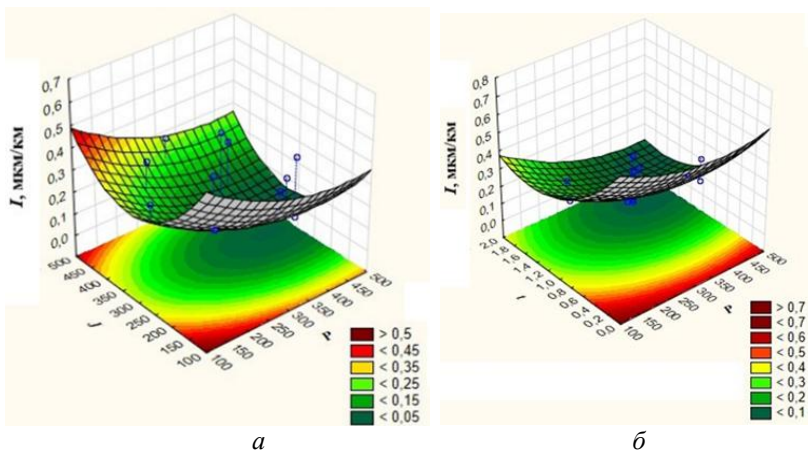


Рис. 1. Графическое представление квадратичной поверхности величины интенсивности изнашивания от давления прессования и плотности тока спекания при $t = 1,5$ с (а), давления прессования и времени воздействия электрическим током при $J = 400$ А/мм² (б)

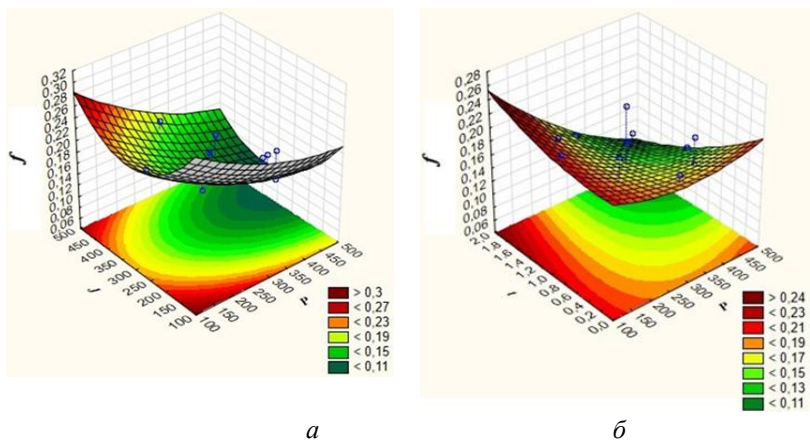


Рис. 2. Графическое представление квадратичной поверхности величины коэффициента трения от давления прессования и плотности тока спекания при $t = 1,5$ с (а), давления прессования и времени воздействия электрическим током при $J = 400$ А/мм² (б)

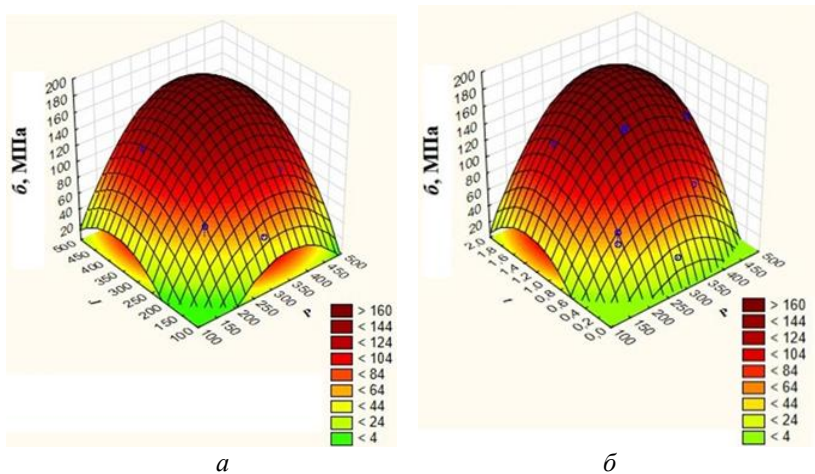


Рис. 3. Графическое представление квадратичной поверхности величины предела прочности при сжатии от давления прессования и плотности тока спекания при $t = 1,5$ с (а), давления прессования и времени воздействия электрическим током при $J = 400$ А/мм² (б)

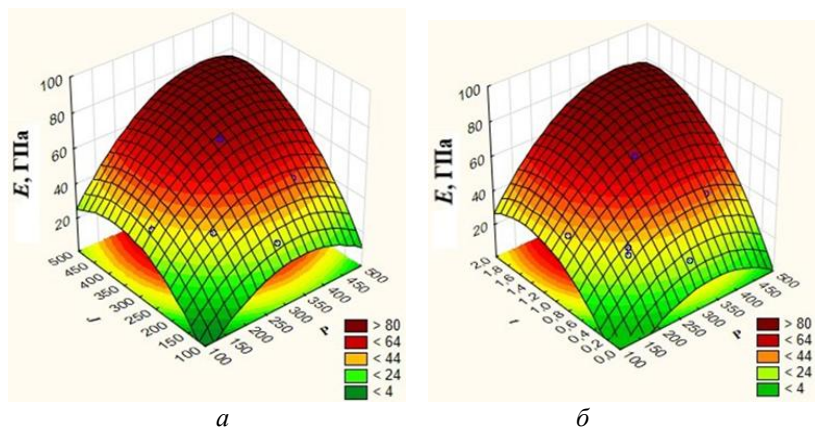


Рис. 4. Графическое представление квадратичной поверхности величины модуля Юнга от давления прессования и плотности тока спекания при $t = 1,5$ с (а), давления прессования и времени воздействия электрическим током при $J = 400$ А/мм² (б)

Установлено, что максимальные прочностные характеристики и минимальные триботехнические характеристики порошковых металлополимерных композиционных материалов будут получены при давлении прессования ≈ 200 МПа, плотности тока спекания ≈ 400 А/мм², времени воздействия электрическим током $\approx 1,5$ с.

Литература

1. Fabrication and mechanical properties of nano-carbon reinforced laminated Cu matrix composites / W. Tan [et al.] // Powder technology. – 2022. – Vol. 395. – P. 377–390.

2. Пасовец В. Н. Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плещачевский. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 200 с.

3. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М. : Металлургия. 1987. – 128 с.

4. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering / R. Orru [et al.] // Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2009. – Vol. 63, Iss. 4–6. – P. 127–287.

5. Lenel F.V. Resistance sintering under pressure. // The journal of the minerals, metals and materials society. – 2017. – No 7. – P. 158–167.

6. Буланов В. Я. Прогнозирование свойств спеченных материалов / В. Я. Буланов, В. Н. Небольсинов. – М. : Наука, 1981. – 151 с.

7. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.