

УДК 621.891:620.22

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-13-26>

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУРАМИ  
УГЛЕРОДА ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

**В. Н. ПАСОВЕЦ, В. А. КОВТУН**

*Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,  
г. Минск*

*Разработана математическая модель процесса электроконтактного спекания порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода. Разработанная модель базируется на статистических методах многофакторного планирования эксперимента и позволяет на основе критериев антифрикционности и прочности установить оптимальные значения давления прессования, плотности тока спекания и времени воздействия электрическим током для получения минимальных значений интенсивности изнашивания, коэффициента трения, а также максимальных значений предела прочности при сжатии и модуля Юнга получаемых композитов. Анализ полученных уравнений регрессии позволил установить, что наибольшее влияние на интенсивность изнашивания, предел прочности при сжатии и модуль Юнга формируемых композитов оказывает время воздействия электрическим током на исходные компоненты металлополимерных композитов.*

**Ключевые слова:** порошковый металлополимерный композит, электроконтактное спекание, математическая модель, наноструктуры углерода, дисперсные полимеры.

**Для цитирования:** Пасовец, В. Н. Оптимизация технологических режимов электроконтактного спекания модифицированных наноструктурами углерода порошковых металлополимерных композитов методом многофакторного планирования эксперимента / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2 (97). – С. 13–26. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-13-26>

**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL MODES  
OF ELECTROCONTACT SINTERING OF POWDER  
METAL-POLYMER COMPOSITES MODIFIED WITH  
CARBON NANOSTRUCTURES USING THE METHOD  
OF MULTIFACTOR EXPERIMENTAL PLANNING**

**V. N. PASOVETS, V. A. KOVTUN**

*State Educational Institution “University of Civil Protection  
of the Ministry of Emergency Situations of Republic  
of Belarus”, Minsk*

*A mathematical model of the process of electrocontact sintering of powder metal-polymer composite materials modified with carbon nanostructures has been developed. The developed model is based on statistical methods of multifactorial experimental design and allows, based on antifricition and strength criteria, to establish optimal values of pressing pressure, sintering current density and electric current exposure time to obtain minimum values of wear intensity, friction coefficient, as well as maximum values of compressive strength and Young's modulus of the resulting composites. Analysis of the obtained regression equations made it possible to establish that the greatest*

*influence on the wear rate, compressive strength and Young's modulus of the formed composites is affected by the time of electric current exposure on the initial components of metal-polymer composites.*

**Keywords:** powder metal-polymer composites, electrocontact sintering, mathematical model, carbon nanostructures, dispersed polymers.

**For citation.** Pasovets V. N., Kovtun V. A. Optimization of technological modes of electrocontact sintering of powder metal-polymer composites modified with carbon nanostructures using the method of multi-factor experimental planning *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 2 (97), pp. 13–26 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-13-26>

### Введение

Одной из тенденций повышения ресурса деталей узлов трения современной техники является использование металлополимерных композиционных материалов на основе порошковой медной матрицы, содержащих в своем составе наноструктуры углерода, например, углеродные нанотрубки (УНТ) и луковичные наноструктуры углерода (ЛНУ) [1, 2]. Однако непосредственное введение дисперсных полимеров и наноструктур углерода в металлическую матрицу путем применения известных классических методов консолидации исходных компонентов осложнено вследствие невысоких температур термо- и термоокислительной деструкции полимеров, а также возможной графитизации наноструктур углерода, сопровождающейся потерей их высоких прочностных свойств и триботехнических характеристик при температуре спекания металлической матрицы. В этом случае использование метода электроконтактного спекания позволяет решить указанную проблему [3, 4]. 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. Преимуществом электроконтактного спекания перед другими видами консолидации исходных компонентов порошковых материалов является совмещение в одной операции стадий прессования и спекания.

Необходимо отметить, что на характеристики получаемых композитов оказывают влияние такие факторы, как свойства исходных компонентов, характер распределения наполнителя в матрице, технологические режимы спекания.

Пропускание электрического тока высокой плотности непосредственно через консолидируемую порошковую систему обеспечивает преимущественное выделение джоулева тепла в зонах контактного взаимодействия частиц металлической матрицы, сопровождающееся плавлением металла матрицы исключительно в зонах контактного взаимодействия металлических частиц [5]. 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.

На сегодняшний день статистические методы планирования и анализа экспериментов получили широкое распространение при проведении научных исследований [6]. Опыт применения указанных методов показывает возможность повышения эффективности проводимых исследований при значительном снижении материальных затрат. Существенный эффект от применения статистических методов наблюдается при изучении сложных процессов с несколькими факторами, оказывающими влияние на свойства материалов, например, при изучении процессов трения и изнашивания [7, 8]. При этом решение таких задач даже в простой постановке ведет к снижению необходимости проведения большого числа экспериментов, связанных с исследованием различных комбинаций воздействия технологических режимов на исходные компоненты порошковых композитов.

Таким образом, цель исследования состояла в оптимизации технологических режимов процесса получения порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, по критериям прочности и антифрикционности методом многофакторного планирования эксперимента.

#### **Материалы и методика исследования**

Исследования проводились с использованием материала на основе порошковой металлической матрицы, содержащего в своем составе 6 мас. % политетрафторэтилена (ПТФЭ) и 0,07 мас. % наноструктур углерода. В качестве металлической матрицы использовался порошок меди ПМС-1 по ГОСТ 4960–2017 без дополнительной очистки. В качестве наноструктур углерода использовалась комбинация УНТ и ЛНУ, состоящая из 20 % УНТ и 80 % ЛНУ. В качестве дисперсного полимерного наполнителя использовались порошки ПТФЭ по ГОСТ 10007–80, плакированные оболочкой меди толщиной от 5 до 7 мкм.

Консолидацию разработанных композиционных металлополимерных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, осуществляли на опытно-промышленной установке УНП 684.22.25, выполненной на базе машины контактной сварки МШ-3207.

Триботехнические испытания проводили в течение 8 часов на машине СМЦ-2 трением скольжения по схеме «вал – частичный вкладыш» при нагрузке 1,5 МПа, скорости скольжения 1,5 м/с и температуре окружающей среды 293 К. Материалом контртела служила сталь 45 твердостью 44 HRC, шероховатость поверхности  $R_a = 0,3–0,4$  мкм. Образцы перед испытаниями обезжиривались в ацетоне (ГОСТ 2603–79). Приработка проводилась при нагрузке 100 кПа до образования полного контакта по всей поверхности трения. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания определялись для режима установившегося трения.

Предел прочности при сжатии определяли по ГОСТ 25.503–97. Модуль Юнга материалов исследовали с помощью нанотестера с компьютерным управлением FISCHERSCOPE H100C (Германия) по стандартным методикам.

Каждое полученное значение триботехнических и прочностных характеристик – среднее трех измерений.

Исследования по определению оптимальных технологических режимов получения металлополимерных композитов, модифицированных наноструктурами углерода, проведены по плану полного факторного эксперимента. Рассмотрена задача о нахождении связи между входными параметрами технологического процесса электроконтактного спекания металлополимерных композиционных материалов (давление прессования, плотность тока и время воздействия электрическим током) и выходными параметрами, в частности триботехническими (интенсивность изнашивания, коэффициент трения) и прочностными (предел прочности при сжатии, модуль Юнга) характеристиками получаемых композитов. Для статистического анализа использовалась программа Statistica 10, позволяющая эффективно планировать и анализировать эксперименты [9].

#### **Результаты и их обсуждение**

Для оценки влияния режимов электроконтактного спекания металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, на процессы их трения и изнашивания, а также прочностные свойства использован статистический метод планирования многофакторного эксперимента [6]. 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  $\sigma$ . 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  $t$ .

Предварительно методом крутого восхождения (метод Бокса–Уилсона) [10] с учетом технических характеристик используемой опытно-промышленной установки УНП 684.22.25 была экспериментально определена область изменения интервалов варьирования. Дальнейшее исследование совместного влияния варьируемых факторов  $P$ ,  $J$  и  $t$  на интенсивность изнашивания, коэффициент трения, модуль Юнга и предел прочности при сжатии композиционных материалов проводили с помощью метода центрального ротатабельного планирования второго порядка с использованием центрального композиционного плана в программном пакете Statistica 10. Величина и область изменения параметров процесса электроконтактного спекания порошковых композитов (независимые переменные  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$ ) представлены в табл. 1. Каждая из кодированных переменных  $Z_i$  принимает значение +1 на верхнем уровне и значение –1 на нижнем уровне переменной.

Таблица 1

**Величина и интервалы варьирования независимых переменных**

Уровни варьирования	Кодовые значения	Параметры процесса (независимые переменные)		
		Давление $P$ , МПа	Плотность тока $J$ , А/мм <sup>2</sup>	Время воздействия электрическим током $t$ , с
		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
Основной	0	300	300	1
Нижний	–1	200	200	0,5
Верхний	+1	400	400	1,5
Нижнее звездное плечо	–1,68	131	131	0,16
Верхнее звездное плечо	+1,68	468	468	1,84
Интервал варьирования	–	100	100	0,5
Зависимость кодированной переменной от натуральной	–	$0,01P - 3$	$0,01J - 3$	$2t - 2$

В общем случае при числе факторов, равном 3, центральный композиционный план включает главные эффекты факторов  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ , их взаимодействия  $Z_1Z_2$ ,  $Z_1Z_3$ ,  $Z_2Z_3$  и квадратичные компоненты  $Z_1^2$ ,  $Z_2^2$ ,  $Z_3^2$ . Уравнение регрессии, учитывающее взаимодействие факторов, имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1Z_1 + b_2Z_2 + b_3Z_3 + b_4Z_1^2 + b_5Z_2^2 + b_6Z_3^2 + b_{12}Z_1Z_2 + b_{13}Z_1Z_3 + b_{23}Z_2Z_3, \quad (1)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению;  $Z_1, Z_2, Z_3$  – кодовые значения факторов.

Согласно плану постановки эксперимента было реализовано 15 опытов. В табл. 2 представлены результаты экспериментальных испытаний по определению триботехнических и прочностных характеристик.

Таблица 2

**Влияние параметров процесса электроконтактного спекания на триботехнические и прочностные характеристики порошковых композитов**

Номер опыта	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	Интенсивность изнашивания $I$ , мкм/км	Коэффициент трения $f$	Предел прочности при сжатии $\sigma$ , МПа	Модуль Юнга $E$ , ГПа
1	+1	+1	+1	0,06	0,11	160	78
2	-1	+1	+1	0,18	0,18	120	56
3	+1	-1	+1	0,14	0,15	104	50
4	-1	-1	+1	0,25	0,19	75	40
5	+1	+1	-1	0,29	0,16	80	45
6	-1	+1	-1	0,36	0,17	65	35
7	+1	-1	-1	0,41	0,2	59	35
8	-1	-1	-1	0,49	0,22	50	30
9	+1,68	0	0	0,16	0,14	125	60
10	0	+1,68	0	0,32	0,19	130	65
11	0	0	+1,68	0,12	0,15	140	70
12	-1,68	0	0	0,32	0,21	45	36
13	0	-1,68	0	0,41	0,24	59	32
14	0	0	-1,68	0,5	0,19	30	25
15	0	0	0	0,15	0,15	140	62

Проведенный анализ разработанного плана эксперимента позволил определить коэффициенты регрессии. Установлено, что коэффициенты детерминации, показывающие, какая доля дисперсии результативного признака объясняется влиянием независимых переменных, близки к 1 и составляют: 0,97 при анализе интенсивности изнашивания; 0,93 при анализе коэффициента трения; 0,97 при анализе предела прочности при сжатии; 0,98 при анализе модуля Юнга. При этом проверка критерия потери согласия показала незначимость данного критерия. Таким образом, полученные результаты моделирования свидетельствуют о высокой адекватности приведенной квадратичной модели и ее соответствии исходным данным.

Изучение карт Парето, которые представляют собой оценки эффектов, отсортированные по своей абсолютной величине, показало, что не все регрессионные коэффициенты в уравнениях регрессии, описывающих влияние исходных факторов на триботехнические и прочностные характеристики материалов, являются статистически значимыми.

После обработки экспериментальных данных были получены уравнения (2)–(5), адекватно отражающие влияние факторов на исследуемые функции. При этом проверка адекватности моделей производилась с помощью  $F$ -критерия для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ :

$$I = 0,159 - 0,048Z_1 - 0,04Z_2 + 0,115Z_3 + 0,065Z_2^2 + 0,045Z_3^2; \quad (2)$$

$$f = 0,152 - 0,019Z_1 - 0,016Z_2 - 0,014Z_3 + 0,019Z_2^2; \quad (3)$$

$$\sigma = 141,095 + 16,662Z_1 + 18,775Z_2 + 25,557Z_3 - 18,999Z_1^2 - 15,64Z_2^2 - 18,999Z_3^2; \quad (4)$$

$$E = 62,596 + 6,397Z_1 + 8,384Z_2 + 11,326Z_3 - 5,358Z_1^2 - 5,182Z_2^2 - 5,535Z_3^2 + 3,625Z_2Z_3. \quad (5)$$

Проверка адекватности полученных уравнений регрессии также выполнена с использованием нормальных вероятностных графиков. Как видно из рис. 1, все значения укладываются на прямые ожидаемых нормальных значений остатков, позволяя считать, что остатки также имеют нормальное распределение.

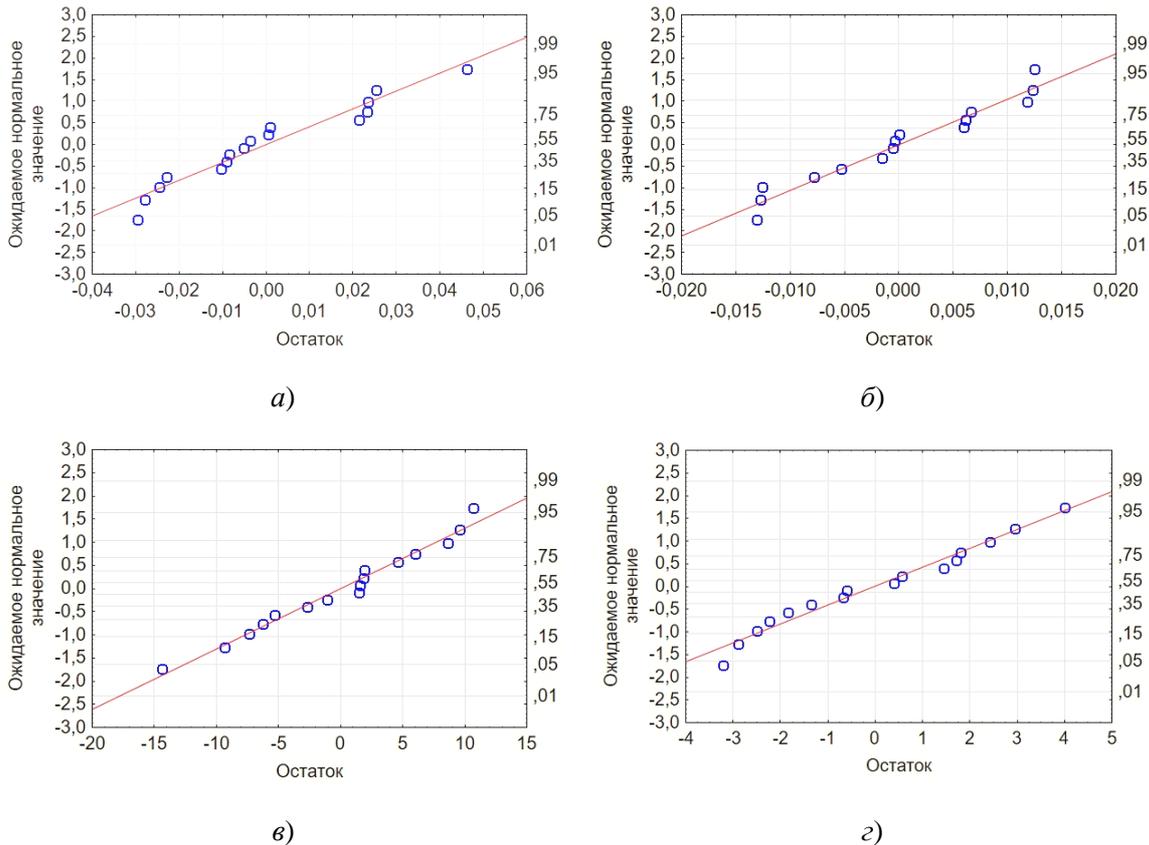


Рис. 1. Нормальный вероятностный график:  
 а – для переменной «интенсивность изнашивания»; б – для переменной «коэффициент трения»; в – для переменной «предел прочности при сжатии»;  
 з – для переменной «модуль Юнга»

Таким образом, с использованием модуля центрального композиционного планирования программного продукта Statistica 10 [9] построены адекватные квадратичные модели, описывающие взаимосвязь давления прессования, плотности тока и времени спекания с триботехническими и прочностными характеристиками получаемых порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода.

Интерпретацию уравнений можно проводить тогда, когда они записаны в кодированных переменных. Только в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов, следовательно, по величине коэффициентов можно судить о степени влияния того или иного фактора. Чем больше величина фактора, тем больше фактор влияет на отклик (изучаемый параметр). Знак «плюс» у коэффициента свидетельствует

вует о том, что с увеличением значения фактора растет величина отклика, а при знаке «минус» – убывает.

Анализируя уравнение (2), можно отметить, что коэффициенты регрессии, имеющие отрицательный знак, означают, что снижение входного параметра фактора варьирования увеличивает интенсивность изнашивания материала. Коэффициенты регрессии, имеющие положительный знак, означают, что снижение входного параметра фактора варьирования уменьшает интенсивность изнашивания. Квадратичные члены уравнения указывают на то, что имеются значения, при которых изменение варьлируемого параметра относительно какого-либо его значения приведет к изменению влияния этого фактора на интенсивность изнашивания на противоположное значение.

Анализ уравнения регрессии (2) позволяет констатировать, что наибольшее влияние на интенсивность изнашивания оказывает фактор  $Z_3$  (время воздействия электрическим током). Меньшее воздействие оказывает фактор  $Z_2$  (плотность тока). Самое незначительное влияние оказывает  $Z_1$  (давление). Аналогичная картина влияния факторов наблюдается при изучении уравнений (4) и (5). Анализ уравнения регрессии (3) показал, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает фактор  $Z_1$ , меньшее воздействие оказывает фактор  $Z_2$ , а самое незначительное влияние оказывает  $Z_3$ .

При переходе от кодированных к натуральным независимым переменным и с учетом значимости коэффициентов регрессии, которая проверялась по  $t$ -критерию для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , уравнения (2)–(5) преобразуются к следующему виду:

$$I = 1,418 - 0,00048P - 0,0043J - 0,59t + 0,0000065J^2 + 0,18t^2; \quad (6)$$

$$f = 0,456 - 0,00019P - 0,0013J - 0,028t - 0,0000019j^2; \quad (7)$$

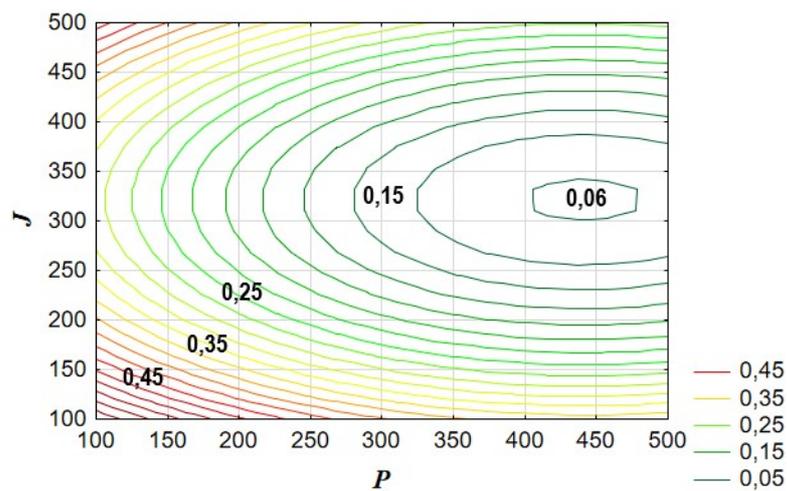
$$\sigma = -410,077 + 1,307P + 1,126J + 209,106t - 0,0019P^2 - 0,0019P^2 - 0,0016J^2 - 75,996t^2; \quad (8)$$

$$E = -99,649 + 0,386P + 0,322J + 45,182t - 0,00054P^2 - 0,00052J^2 - 22,14t^2 + 0,073Jt. \quad (9)$$

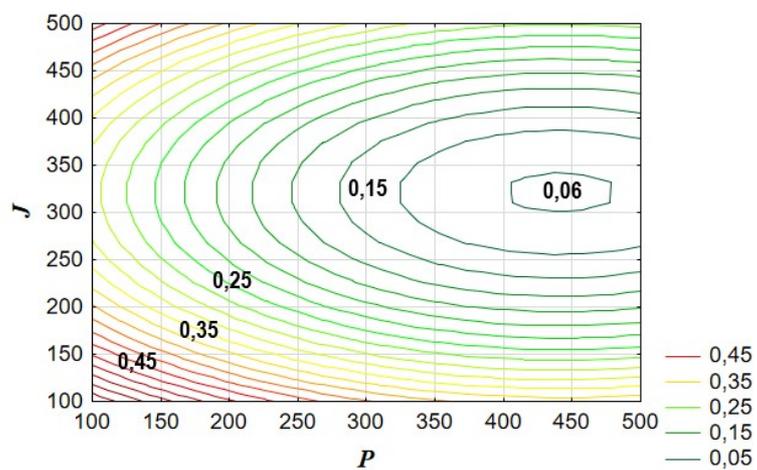
Полученные уравнения позволяют определить интенсивность изнашивания, коэффициент трения, предел прочности при сжатии и модуль Юнга порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, при любых значениях давления прессования, плотности тока спекания и время воздействия электрическим током.

На рис. 2–5 представлены уровни равных значений интенсивности изнашивания, коэффициента трения, модуля Юнга и предела прочности при сжатии образцов композиционных порошковых металлополимерных композитов, модифицированных наноструктурами углерода.

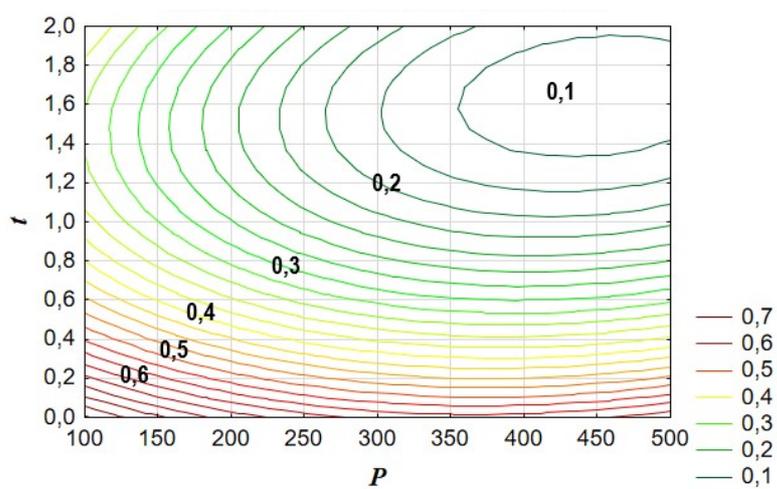
Использование вычисленных графиков позволяет установить значения интенсивности изнашивания  $I$ , коэффициента трения  $f$ , модуля Юнга  $E$  и предела прочности при сжатии  $\sigma$  при различных значениях давления прессования  $P$ , плотности тока спекания  $J$  и времени воздействия электрическим током  $t$ .



а)

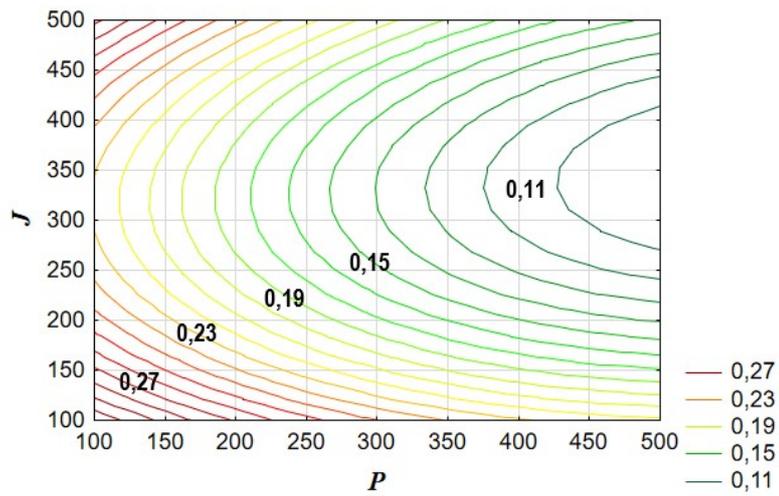


б)

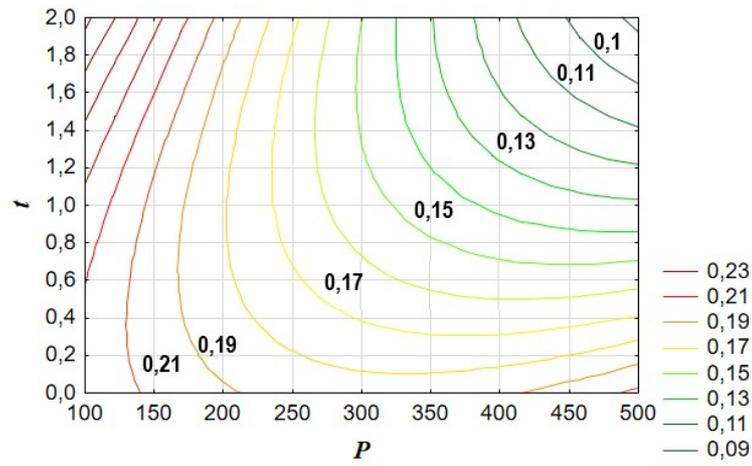


в)

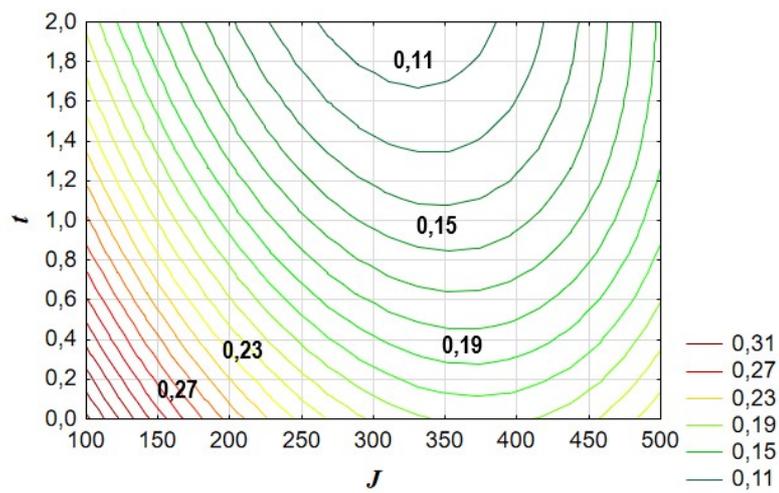
Рис. 2. Уровни равных значений  $I$ :  
 а – от  $P$  и  $J$  при  $t = 1,5$  с; б – от  $P$  и  $t$  при  $J = 400$  А/мм<sup>2</sup>;  
 в – от  $J$  и  $t$  при  $P = 400$  МПа



a)

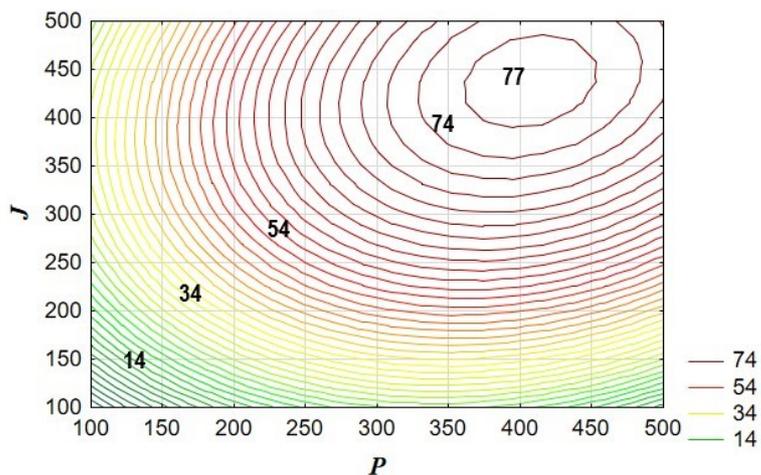


б)

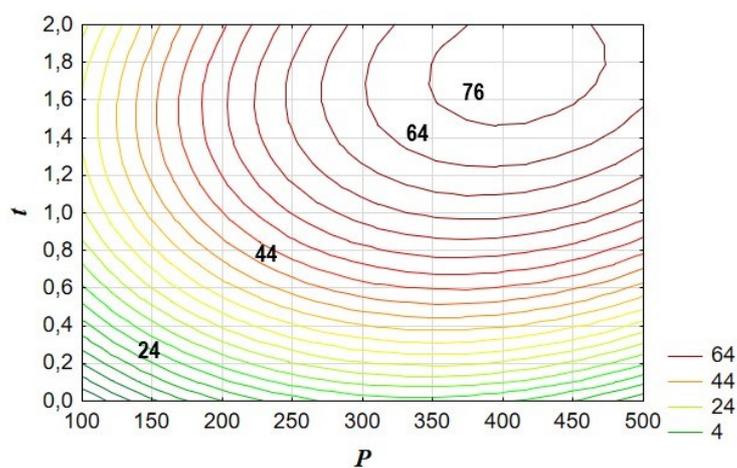


в)

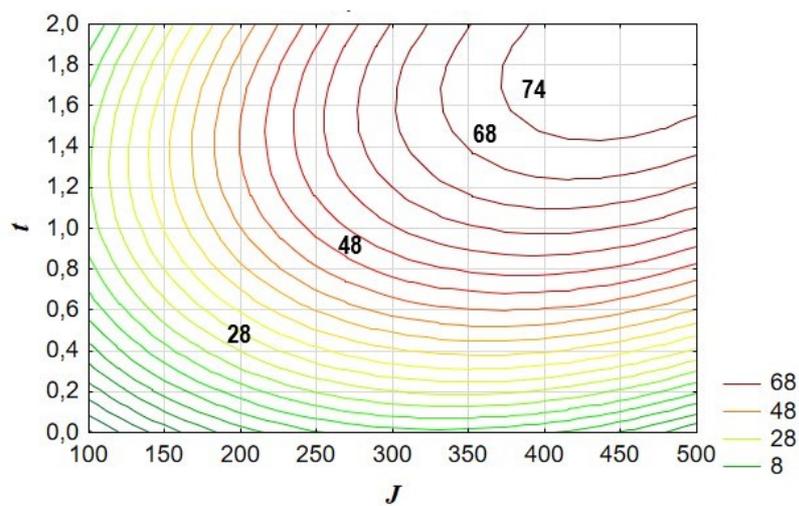
Рис. 3. Уровни равных значений  $f$ :  
 а – от  $P$  и  $J$  при  $t = 1,5$  с; б – от  $P$  и  $t$  при  $J = 400$  А/мм<sup>2</sup>;  
 в – от  $J$  и  $t$  при  $P = 400$  МПа



а)

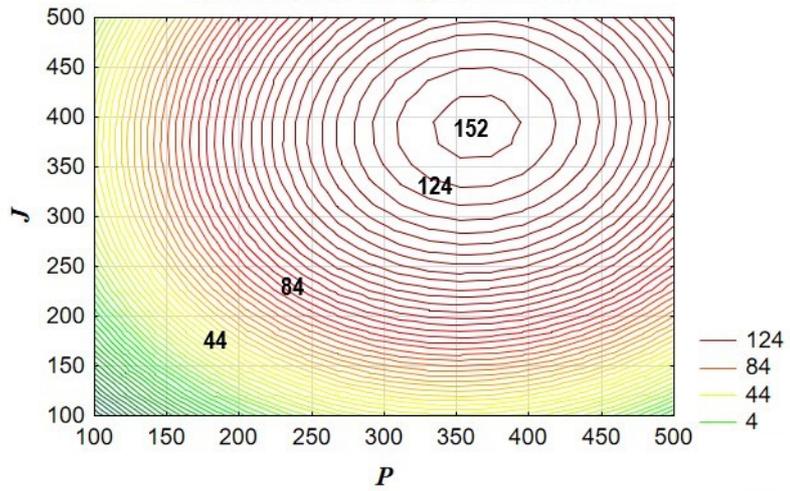


б)

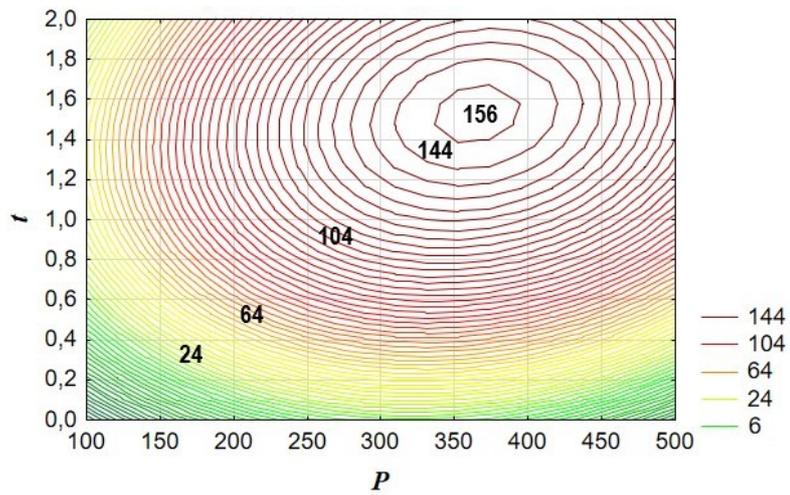


в)

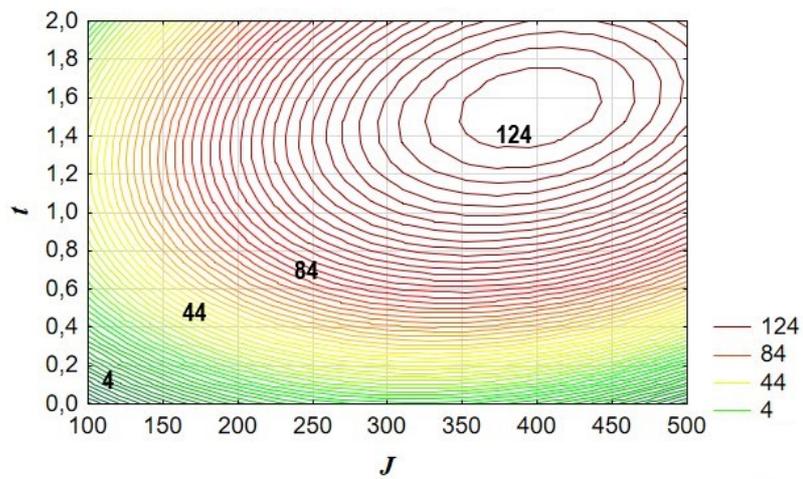
Рис. 4. Уровни равных значений  $E$ :  
 а – от  $P$  и  $J$  при  $t = 1,5$  с; б – от  $P$  и  $t$  при  $J = 400$  А/мм<sup>2</sup>;  
 в – от  $J$  и  $t$  при  $P = 400$  МПа



a)



б)



в)

Рис. 5. Уровни равных значений  $\sigma$ :  
 а – от  $P$  и  $J$  при  $t = 1,5$  с; б – от  $P$  и  $t$  при  $J = 400$  А/мм<sup>2</sup>;  
 в – от  $J$  и  $t$  при  $P = 400$  МПа

С использованием уравнений (6)–(9) решена задача оптимизации, заключающаяся в определении оптимальных значений факторов, при которых будут получены минимальные значения триботехнических и максимальные значения прочностных характеристик получаемых композиционных материалов (рис. 6).

При решении задачи оптимизации применена функция Харрингтона, позволяющая определить максимальные значения прочностных свойств получаемых материалов при их минимальных значениях триботехнических характеристик в рассматриваемом диапазоне. То есть оптимальным выходным параметрам присваивалось значение 1, а нежелательным выходным параметрам присваивалось значение 0.

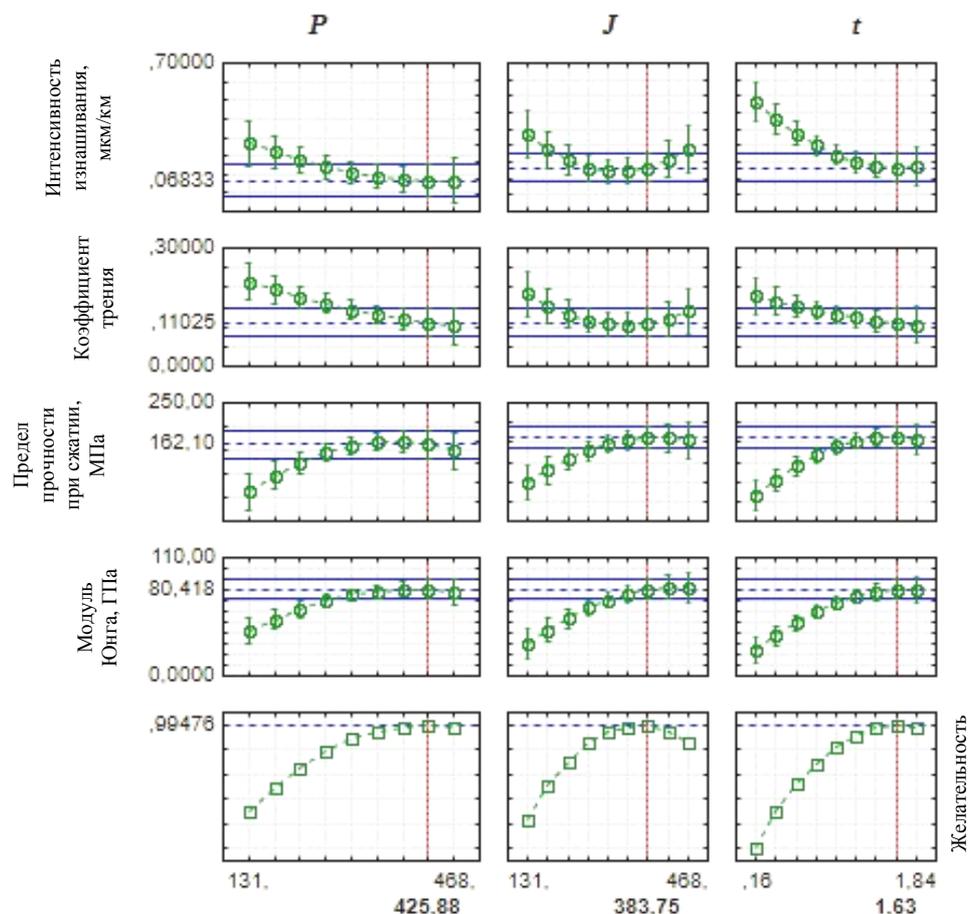


Рис. 6. Расчет оптимальных значений прочностных и триботехнических характеристик порошковых металлополимерных композитов, модифицированных наноструктурами углерода, и функции желательности

На основании рис. 6 можно сделать вывод, что максимальные прочностные и минимальные триботехнические характеристики порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, будут получены при следующих технологических режимах процесса электроконтактного спекания: давление прессования – 426 МПа; плотность тока спекания – 384 А/мм<sup>2</sup>; время воздействия электрическим током – 1,6 с.

### Заключение

Разработана математическая модель процесса электроконтактного спекания порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода, основанная на статистических методах многофакторного

планирования эксперимента, учитывающая параметры технологического воздействия на исходные компоненты и позволяющая на основе критериев антифрикционности и прочности установить оптимальные значения давления прессования, плотности тока спекания и времени воздействия электрическим током для получения минимальных значений интенсивности изнашивания и коэффициента трения, а также максимальных значений предела прочности при сжатии и модуля Юнга формируемых композитов.

Анализ полученных уравнений регрессии позволил установить, что наибольшее влияние на интенсивность изнашивания, предел прочности при сжатии и модуль Юнга формируемых композитов оказывает время воздействия электрическим током на исходные компоненты металлополимерных композитов, являясь важнейшим параметром процесса электроконтактного спекания.

Результаты проведенных исследований позволяют прогнозировать, корректировать и назначать режимы технологического процесса электроконтактного спекания с учетом заранее заданных условий эксплуатации порошковых металлополимерных композиционных материалов, модифицированных наноструктурами углерода.

### 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. Плескачевский. – 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, N 4–6. – P. 127–287.
5. Lenel, F. V. Resistance sintering under pressure / F. V. Lenel // *The journal of the minerals, metals and materials society*. – 2017. – N 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.
8. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М. : Наука, 1980. – 228 с.
9. Халафян, А. А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете Statistica / А. А. Халафян. – М. : Лиبرоком, 2013. – 384 с.
10. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента / А. П. Моргунов, И. В. Ревина. – Омск : ОмГТУ, 2014. – 344 с.

### References

1. Tan W., Jiang X., Shao Zh., Sun H., Fang Y., Shu R. Fabrication and mechanical properties of nano-carbon reinforced laminated Cu matrix composites. *Powder technology*, 2022, vol. 395, pp. 377–390.

2. Pasovets V. N., Kovtun V. A. *Preparation, properties and safety of composites based on powder metals and carbon nanostructures*. Gomel, Belorusskij gosudarstvennyj universitet transport Publ., 2011. 200 p. (in Russian).
3. Rajchenko A. I. *Fundamentals of the process of sintering powders by electric current transmission*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 128 p. (in Russian).
4. Orru R., Licheri R., Locci A. M., Cincotti A., Cao G. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. *Materials science and engineering*, 2009, vol. 63, iss. 4–6, pp. 127–287.
5. Lenel F. V. Resistance Sintering Under Pressure. *The journal of the minerals, metals and materials society*, 2017, no. 7, pp. 158–167.
6. Bulanov V. Ya. Nebol'sinov V. N. *Prediction of properties of sintered materials*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 151 p. (in Russian).
7. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Statistical methods of planning extreme experiments*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 340 p. (in Russian).
8. Evdokimov Yu. A., Kolesnikov V. I., Teterin A. I. *Planning and analysis of experiments in solving friction and wear problems*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 228 p. (in Russian).
9. Khalafyan A. A. *Industrial statistics: quality control, process analysis, experiment planning in Statistica package*. Moscow, Librokom Publ., 2013. 384 p. (in Russian).
10. Morgunov A. P., Revina I. V. *Planning and analyzing the results of the experiment*. Omsk, Omskii gosudarstvennyj tekhnicheskii universitet Publ., 2014. 344 p. (in Russian).

Поступила 27.03.2024