

## Влияние температурного режима на спекание медных порошковых материалов с карбидом кремния в машинах и механизмах сельскохозяйственного назначения

*Т.В. Рожкова, к.т.н., Н.И. Смолин, к.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья*

Порошковая металлургия, как один из способов изготовления деталей, относится к безотходным технологиям, что имеет важное значение для сельскохозяйственного и общего машиностроения. Исследователи пытаются создать новые композитные материалы, необходимые для получения изделий, эксплуатирующиеся в различных машинах и механизмах сельского хозяйства. Метод электроконтактного спекания, как разновидность порошковой металлургии, давно используется не только для изготовления, но и для восстановления изношенных поверхностей деталей. Простота и дешевизна специального приспособления, установленного на сварочную машину МРС-50, позволяет применять его для ремонта различных деталей сельскохозяйственной техники [1]. Поршневые кольца, втулки и другие изделия простой формы, восстановленные на ремонтных базах сельхозпредприятий, значительно увеличивают срок службы данных деталей, ускоряют и удешевляют процесс. Покрытия из порошковых материалов на основе меди с добавлением карбида кремния, нанесённые электроконтактным методом, позволяют получать изделия, которые по своим физико-механическим свойствам не уступают литому материалу. Полученное покрытие обеспечивает износостойкость поверхностного слоя и не приводит к выкрашиванию упрочняющих частиц в процессе эксплуатации.

Порошковая заготовка (или покрытие из порошкового материала) представляет собой соединение частиц различных размеров и формы. Основное влияние на процесс прессования порошкового материала вносят контакты, образующиеся между частицами.

Моделирование температурного процесса порошкового материала можно рассматривать как для элементарного объёма, так и для всей сплошной среды. Для рассмотрения процесса моделирования как при предварительном холодном прессовании, так и при электроконтактном спекании под воздействием электрического тока необходимо выделить частицу порошкового материала в качестве отдельного структурного элемента.

**Цель исследования** – рассмотреть изменение температуры в зоне контакта двух частиц при предварительном холодном прессовании медного порошкового материала.

**Материал и методы исследования.** Исследование процесса деформационного механизма при предварительном холодном прессовании необходимо для дальнейшего изучения особенностей

взаимодействия и деформации частиц внутри элементарных объёмов, что позволяет рассмотреть физическую основу процесса уплотнения. К числу особенностей при прессовании можно отнести неоднородную деформацию, обусловленную одновременным скольжением и поворотом частиц внутри представленной сплошной среды порошкового материала [2].

В качестве исследуемого материала использовали порошок меди со средними размерами частиц 23 мкм. В качестве упрочнителя был добавлен порошок зелёного карбида кремния (от 5,1 до 20,5% масс) с размерами фракций 8÷26 мкм. Исходными параметрами являются: при предварительном прессовании и электроконтактном спекании давление 35 МПа, при электроспекании напряжение 3,34 В [3]. Введение в состав медного порошкового материала карбида кремния позволяет значительно улучшить физико-механические свойства и упрочнить спекаемую заготовку, что необходимо для последующей механической обработки и эксплуатации полученных деталей.

Представим математическую модель порошкового материала в виде контакта сферических частиц одинакового размера. Форма частиц после прессования приближена к шаровидной (или сферической). Такая модель более полно даёт представление о структуре и исходной плотности порошкового материала.

На предварительном этапе, когда частицы порошковой смеси располагаются свободно в пресс-форме, температура соответствует комнатной, т.е.:

$$t_q = t_k \approx 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K},$$

где  $t_q$  – температура частицы;

$t_k$  – температура комнатная.

При приложении внешнего двустороннего давления (35 МПа) частицы порошка не только вступают в контакт друг с другом, но и претерпевают некоторую деформацию. При этом в зоне контакта возникают температурные градиенты. У поверхности раздела частиц выделяется теплота, которая первоначально сконцентрирована в зоне контакта, а затем распределяется по всему их объёму и далее распространяется на соседние частицы (рис. 1). Тепловые потоки встречаются в центре частицы, что приводит к повышению температуры и возникновению пластической деформации. Механическое взаимодействие в месте контакта частиц приводит к выделению тепловой энергии, происходит нагрев и слипание частиц друг с другом. Результатом процесса деформации является уплотнение порошкового материала и изменение формы частиц, тогда как их объём остаётся неизменным [4]. При этом происходит

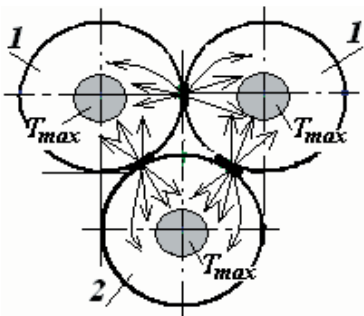


Рис. 1 – Распределение тепловых потоков

смещение и пластическая деформация частиц, что приводит к заполнению пустот и в конечном итоге к изменению объёма самой прессовки.

Модель процесса характеризуется параметрами и условиями, как геометрическими, так и физическими. К геометрическим параметрам относятся формы и размеры самой порошковой системы, а также её отдельной частицы. Физические параметры учитывают свойства порошкового материала: мощность и её законы изменения во времени, внутренние источники энергии и их распределения в пространстве, плотности температурных полей и тепловых потоков, а также характер влияния окружающей среды на модель [5]. Смоделируем процесс теплового баланса в результате предварительного холодного прессования порошковой смеси (рис. 2).

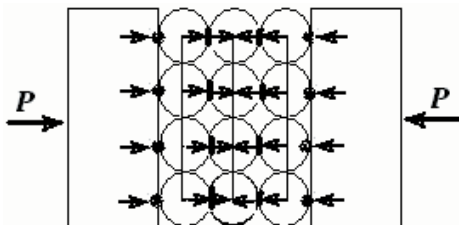


Рис. 2 – Моделирование процесса теплового баланса:  
 — контакты частица-частица;  
 • контакты частица-пуансон

Величина температурных градиентов в зоне контакта зависит от усилия прессования. На модели видно, что наибольшее распределение температуры происходит к центру частицы, расположенной в среднем ряду по линии приложенного давления. Перпендикулярно линии действия силы в зонах контактирования частиц также происходит повышение температуры. В свою очередь контакты частица – пуансон тоже вносят свой вклад в изменение температуры [6]. При этом графитовая прослойка между пуансоном и порошковой смесью будет являться своего рода изолятором и при моделировании её влияние на распределение температуры нами не рассматривается [1].

**Результаты исследования.** Рассчитаем температуру в зоне контакта двух частиц (материал – медь) в процессе предварительного холодного прессования. Расчёт проведём для диаметра частицы 44

мкм при диаметре матрицы 4,7 мм. Рассмотрим процесс прессования при прямом приложении внешнего давления.

Внешнее давление  $P_{вн}$  при прямолинейном его приложении будет распределяться по зонам контакта и рассеиваться в порошковом материале. Вектор этого давления  $P_{вн}$  раскладывается на две составляющие:  $P_{вн} = P_{вн1} + P_{вн2}$ . При этом давление (прямое)  $P_{вн1}$  будет направлено вдоль оси сферической частицы, давление  $P_{вн2}$  (косвенное) будет направлено под углом  $\phi$  (рис. 3) [7].

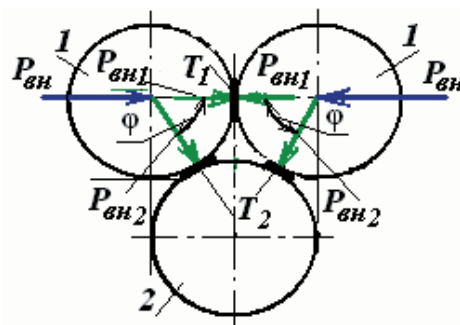


Рис. 3 – Концентрация температурных градиентов в зонах контактов под действием прямого и косвенного давлений

Зависимость изменения температуры  $\Delta T$  от количества теплоты, выделяемой в объёме зоны контакта  $V_k$ , определится соотношением:

$$\Delta T_k = \frac{Q}{c_p V_k}, \tag{1}$$

где  $c_p$  – объёмная удельная теплоёмкость,  $\frac{Дж}{см^3 \cdot К}$ .

Тогда количество теплоты  $Q$ , выделившейся в объёме за время  $t$ ,

$$Q = Nt = Fvt = pS_k vt, \tag{2}$$

- где  $N$  – мощность,  $Вт$ ;
- $t$  – время продолжительности деформации частиц,  $с$ ;
- $F$  – усилие прессования,  $Н$ ;
- $v$  – скорость деформации частиц,  $м/с$ ;
- $p$  – давление прессования,  $МПа$ ;
- $S_k$  – площадь контакта,  $м$ .

Следовательно, изменение температуры  $\Delta T$  в зоне контакта за счёт выделившейся теплоты определится как:

$$\Delta T = \frac{pS_k vt}{c_p V_k} = \frac{pS_k h_k}{c_p V_k} = \frac{P_{вн}}{c_p}. \tag{3}$$

Тогда при прямом приложении внешнего давления  $P_{вн1}$  изменение температуры  $\Delta T_{к1}$  в зоне контакта для частицы диаметром 44 мкм будет равно:

$$\Delta T_{к1} = \frac{P_{вн1}}{c_p} = 9,589 \approx 10^\circ К, \tag{4}$$

где внешнее давление  $P_{вн1} = 35$  МПа, объёмная удельная теплоёмкость меди  $c_p = 3,65 \frac{Дж}{см^3 \cdot К}$  при температуре  $T_o = 25^\circ C = 298^\circ K$ .

Таким образом, температура в зоне контакта 2 частиц повышается на  $9,589^\circ К$  и становится равной  $T_1 = T_o + \Delta T_{к1} = 307,589^\circ К$ .

Значения изменения температуры в зоне контакта для различного вида давлений

Параметр	С учётом прямого давления при диаметре матрицы			С учётом косвенного давления при диаметре матрицы			С учётом бокового давления от влияния сил	
	5,7	13,7	20,5	5,7	13,7	20,5	$P_{\text{вн1}}$	$P_{\text{вн2}}$
Давление, МПа	35	35	35	30,31	30,31	30,31	18,9	16,36
Сила, Н	892,5	5155,5	11546,4	772,9	4465,7	9999,2	481,95	417,18
Изменение температуры в зоне контакта $\Delta T$ , °K	9,589	9,589	9,589	5,178	5,178	5,178	2,42	2,09
Конечная температура в зоне контакта $T$ , °K	307,59			303,178			300,42	300,09

Данный расчёт выполнен для прямого приложения внешнего давления. В большинстве случаев на изменение температуры в зоне контакта  $\Delta T_K$  будет также действовать косвенное давление  $P_{\text{вн2}}$ , которое действует под углом  $\phi = 60^\circ$ :

$$P_{\text{вн2}} = P_{\text{вн1}} \cdot \cos \phi = 30,31 \text{ МПа}. \quad (6)$$

Тогда изменение температуры будет равно:

$$\Delta T_{K_2} = \frac{P_{\text{вн2}}}{c\rho} = 5,178 \approx 5^\circ K. \quad (7)$$

Таким образом, температура в зоне контакта 2 частиц в момент действия косвенного давления повышается на  $5,178^\circ K$  и становится равной:

$$T_2 = T_o + \Delta T_{K_2} = 303,178^\circ K. \quad (8)$$

Кроме прямого и косвенного давлений на боковые стенки матрицы действует боковое давление, которое зависит от вышеназванных параметров:

$$P_{\text{бок1}} = \xi \cdot P_{\text{вн1}} = 18,9 \text{ МПа},$$

$$P_{\text{бок2}} = \xi \cdot P_{\text{вн2}} = 16,36 \text{ МПа}. \quad (9)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления (для меди  $\xi = 0,54$ ).

Тогда изменение температуры в зоне контакта при действии бокового давления от влияния прямого и косвенного давлений будет равно:

$$\Delta T_{K\text{бок1}} = \frac{\xi \cdot P_{\text{бок1}} \cdot \sin \phi}{c\rho} = 2,42^\circ K,$$

$$\Delta T_{K\text{бок2}} = \frac{\xi \cdot P_{\text{бок2}} \cdot \sin \phi}{c\rho} = 2,09^\circ K. \quad (10)$$

Таким образом, температура в зоне контакта частица – матрица повышается на  $2,43^\circ K$  и становится равной:

$$T_1 = T_o + \Delta T_{K\text{бок1}} = 300,42^\circ K,$$

$$T_2 = T_o + \Delta T_{K\text{бок2}} = 300,09^\circ K. \quad (11)$$

Проведём расчёт силы прессования  $F$  при диаметре матрицы  $d = 5,7 \text{ мм}$ , когда давление прессования составляет  $P_{\text{вн}} = 35 \text{ МПа}$ :

$$F = P_{\text{вн}} \cdot S = 35 \cdot 10^6 \cdot 25,5 \cdot 10^{-6} = 892,5 \text{ Н}, \quad (12)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения матрицы,

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,7^2}{4} = 25,5 \text{ мм}^2.$$

Аналогичные расчёты выполним для диаметра матрицы 13,7 и 20,5 мм [8].

Расчёт силы прессования  $F$ , когда действует боковое давление, проведём только при диаметре матрицы  $d = 5,7 \text{ мм}$ :

$$F = P_{\text{вн1}} \cdot S = 18,9 \cdot 10^6 \cdot 25,5 \cdot 10^{-6} = 481,95 \text{ Н},$$

$$F = P_{\text{вн2}} \cdot S = 16,36 \cdot 10^6 \cdot 25,5 \cdot 10^{-6} = 417,18 \text{ Н}.$$

Полученные данные сведём в таблице.

При расчёте изменения температуры в зоне контакта не учитывалась пористость порошкового материала. Это предстоит выполнить на этапах исследования.

**Выводы.** В результате проведённого исследования было выяснено следующее:

1. Температурное поле в зоне контакта частиц неравномерно и распределяется к центру частицы обратно пропорционально силе приложенного давления.

2. Значительный вклад в повышение температуры в зоне контакта вносит прямое давление  $P_{\text{вн1}}$ .

3. Изменение температуры под влиянием косвенного и бокового давлений уменьшается в 2 и в 5 раз соответственно по сравнению с изменением  $\Delta T$  под действием прямого давления.

4. Изменение температуры не зависит от диаметра матрицы, при этом давление остаётся неизменным, а усилие будет меняться в зависимости от сечения пресс-формы.

### Литература

1. Рожкова Т.В. Исследование новых способов электроконтактного спекания порошковых материалов // Вестник государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2016. № 2. С. 122–129.
2. Цеменко В.Н. Теория порошковой металлургии. Теория и физические основы уплотнения порошковых материалов: учеб. пос. СПб.: изд-во СПбГПУ, 2005. 180 с.
3. Рожкова Т.В. Физико-механические характеристики порошковых материалов на основе меди // Вестник государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2016. № 1. С. 150–155.
4. Рожкова Т.В., Кусков В.Н., Смолин Н.И. Исследование влияния межчастичных контактов на процесс предварительного прессования порошкового материала // Агропромышленная политика России. 2017. № 11. С. 140–144.
5. Ковтун В.А., Пасовец В.Н. Моделирование и исследование теплового состояния порошковой системы на разных уровнях температурного воздействия в процессе электроконтактного спекания // Молодые учёные-2008: матер. V Междунар. науч.-технич. школы-конф. М., 2008. Ч. 3. С. 97–102.
6. Плещачевский Ю.М., Ковтун В.А. Основы технологии электроконтактного спекания наноструктурированных металлополимерных покрытий триботехнического назначения // Автоматическая сварка. 2013. № 10-11. С. 72–79.
7. Рожкова Т.В., Кусков В.Н., Смолин Н.И. Исследование деформационного механизма порошкового материала на основе меди // Агропромышленная политика России. 2017. № 12.
8. Рожкова Т.В. Формирование структуры и свойств материалов на основе меди с карбидом кремния при электроконтактном спекании: дисс. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2004. 160 с.