

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.762

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)

Мезин И.Ю., Касаткина Е.Г., Понурко И.В., Кургузов С.А.

## ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ НА АКТИВАЦИЮ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПОРОШКЕ

**Аннотация.** В представленной работе холодная обработка давлением пористых порошковых металлических материалов рассматривается не только как формоизменяющая технологическая операция, но и как процесс, формирующий сам материал, его структуру и свойства. В работе рассмотрены физико-химические аспекты воздействия внешних силовых факторов на процессы формирования межчастичных контактов в порошковой среде. Анализируется активация контактных поверхностей металлических частиц на примере медного порошка, при формировании изделий из материалов на его основе в процессах холодной обработки давлением. В результате выполненных исследований предложены аналитические зависимости и построены графики, отражающие закономерности образования активных центров на контактных поверхностях деформируемых частиц медного порошка. С помощью полученных зависимостей также возможно прогнозирование прочностных свойств получаемых дискретных материалов в зависимости от степени деформации и параметров микросварки давлением при их получении. Установлено, что рост прочности порошкового материала может происходить не только в результате его уплотнения и упрочнения собственно материала-основы, но и в результате явления «схватывания», то есть наличия и реализации активных центров на пятнах действительного контакта порошковых частиц. Представленные результаты могут быть полезны и рекомендованы для анализа процессов взаимодействия порошковых частиц при обработке давлением некомпактных порошковых металлических сред.

**Ключевые слова:** порошковый материал, холодное пластическое деформирование, активация контактных поверхностей, активный центр, частота выхода дислокаций, плотность дислокаций, энергия выхода дислокации, относительная прочность

## Введение

Порошковые композиционные материалы в настоящее время нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, к числу которых можно отнести металлургию, машиностроение, приборостроение, производство инструмента и др. Известно, что свойства используемых порошковых материалов зависят не только от их состава и технологии производства, но и от качества соединения отдельных частиц порошковой среды. Традиционными операциями, в процессе которых образуется соединение между частицами, в порошковой металлургии считаются спекание и горячее прессование [1]. Однако исследования многих отечественных и зарубежных ученых показывают, что явления, протекающие при спекании и холодном прессовании, являются стадиями одного и того же процесса, процесса консолидации порошковой среды [2, 3, с. 10-25, 4-6]. В этом контексте холодная пластическая деформация пористых порошковых материалов рассматривается не только как формоизменяющая технологическая операция, а как еще и процесс, формирующий сам материал, его структуру и свойства. Г.В. Самсонов в своих работах отмечает, что «Процессы прессования порошков сводятся к контактному взаимодействию частиц, аналогичному холодной сварке...» [7]. Процесс образования соединения при сварке давлением рассматривается протекающим в три основные стадии [7-9]:

1) образование физического контакта;

- 2) активация контактных поверхностей;
- 3) объемное взаимодействие.

В рамках представленной работы активация контактных поверхностей порошковых частиц при обработке давлением рассматривается как одна из важных стадий формирования порошкового материала. В связи с этим теоретический анализ процессов активации контактной поверхности порошковой среды под действием прикладываемого внешнего силового воздействия представляется актуальным и представляет практический интерес для оценки формируемых прочностных свойств порошкового материала.

## Методы и условия проведения исследований

Изучение процессов активации контактной поверхности в порошковой среде под действием прикладываемого внешнего силового воздействия осуществлялось методом теоретического анализа с использованием основных положений широко апробированных теорий прессования и спекания металлических порошков [10, 11], обработки металлов давлением [12], совместной пластической деформации разных металлов [13], а также физико-химических закономерностей соединения металлов в твердой фазе при сварке давлением [7-9].

Расчетные эксперименты и тестовые расчеты проведены с использованием полученных в ходе теоретического исследования аналитических зависимостей и выполнены на примере медного порошка ПМС-1 по ГОСТ 4960-2017. При этом во внимание были приняты справочные данные о его химических, физических и технологических свойствах [14], а также физико-

химические и механические свойства меди марки М1 по ГОСТ 859-2014 [15]. Условия силового воздействия удовлетворяли соответствующим технологическим параметрам статического холодного прессования порошковой формовки в закрытой пресс-форме [16].

При анализе процессов активации контактных поверхностей учитывались следующие основные факторы [9]:

1. Величина энергии, выносимой каждой дислокацией в зону физического контакта частиц.

2. Распределение энергии вокруг дислокации при выходе ее на поверхность с учетом сил зеркального отображения.

3. Частота выхода дислокаций в зону физического контакта.

4. Величина энергетического барьера, при достижении или превышении которого в пределах отдельного активного центра осуществляется разрыв старых связей.

Полагая, что соединение частиц дискретной среды происходит точно так же, как и соединение двух компактных металлов в твердой фазе под действием силового воздействия, для анализа срачивания частиц порошков пластичных металлов целесообразно принять некоторые допущения, характерные для сварки давлением компактных металлов [17]:

1. Атомы соединяемых поверхностей твердых тел уже находятся в состоянии физического контакта.

2. Параметры сварки (температура и давление) таковы, что образование новых фаз не происходит.

3. Химическое взаимодействие происходит на активных центрах. Активным центром считается область радиуса  $r$  вокруг вышедшей на контактную поверхность дислокации, включающая очаг взаимодействия (зона радиусом  $\approx 15b$  [9] вокруг ядра дислокации) и зону релаксации энергии до уровня  $U$ .

4. Если в результате выхода дислокации в зону физического контакта активируется, по крайней мере,  $n$  атомов в области активного центра на одной из контактных поверхностей, достигая или превышая энергетический барьер  $U$ , то они могут образовывать химические связи с атомами другой поверхности. Если такие связи образованы, то они в дальнейшем не разрушаются.

5. Активные центры считаются независимыми, то есть вероятность возникновения  $i$ -го активного центра не зависит от возникновения остальных центров.

6. При постоянных параметрах  $T$  и  $P$  процесса каждый выход дислокаций вызывает активацию постоянного числа  $n$  атомов, приводящую к достижению энергии уровня  $U$  и выше.

7. Число активных центров, возникающих за конечный промежуток времени, конечно.

## Результаты и их обсуждение

В соответствии с принятыми допущениями следует считать, что при прессовании металлического порошка поверхности его частиц находятся в физическом контакте. Образование межатомных связей в прессуемой заготовке происходит на активных центрах поверхности частиц. Такими центрами могут являться участки поля упругих искажений, образованные вышедшими в зону физического контакта частиц отдельных дислокаций или их скоплений. В пределах указанных участков энергия возбужденных атомов соответствует уровню, достаточному для разрыва старых и образования новых межатомных связей [8, 9]. Активация поверхностей частиц порошка из пластичных металлов происходит в результате разрыва связей между атомами кристаллической решетки и атомами хемсорбированного кислорода. Указанный разрыв может происходить, в том числе и за счет энергии выходящих на поверхность дислокаций во время пластического деформирования [8, 9].

Энергия  $U_k$ , приобретаемая атомами поверхности пластичных частиц (в рассматриваемом случае - частиц медного порошка) в результате выхода дислокации, определяется как энергия искажения  $k$ -го ряда атомов вокруг ядра дислокации у поверхности с учетом сил зеркального отображения [18]:

$$U_k = \frac{2Q}{8\pi^2 a} \left[ 1 - \cos \frac{4\pi R_k}{b} \right], \quad (1)$$

величина смещения  $k$ -го ряда

$$R_k = -\frac{b}{2\pi} \arctg \left( \frac{r_k}{f} \right), \quad (2)$$

ширина поля дислокации

$$f = \frac{a}{2(1-\mu)}, \quad (3)$$

где  $Q$  – полная энергия дислокации, включающая энергию ядра и поля искажений вокруг нее;

$b$  – модуль вектора Бюргера, для меди  $b = 25,4 \cdot 10^{-9}$  м;

$r_k$  – расстояние в плоскости вектора Бюргера до рассматриваемого  $k$ -го ряда;

$\mu$  – коэффициент Пуассона, для меди  $\mu = 0,35$ ;

$a$  – постоянная решетки, для меди  $a = 2,55 \cdot 10^{-10}$  м.

Полную энергию дислокации, вышедшей на поверхность при деформировании медной частицы, можно определить следующим образом [19]:

$$Q = Gb^3, \quad (4)$$

где  $G$  – модуль сдвига, для меди  $G = 4000 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

Таким образом, полная энергия дислокации при деформировании медной частицы по результатам расчетов составила  $Q = 0,655 \cdot 10^{-12}$  Дж.

В табл. 1 представлены результаты расчетов энергетического барьера, который может быть преодолен атомным рядом частицы медного порошка в зависимости от расстояния до ядра дислокации.

Таблица 1

Расчетная величина энергетического барьера

$r_k \cdot 10^{-8}$ м	10	15	30	38,1
$U_k \cdot 10^{-5}$ , Дж	13,01195	13,011978	13,011994	13,011997

В соответствии с принятым допущением, активным центром является область вокруг вышедшей на поверхность деформируемой частицы дислокации. Поэтому частоту появления активных центров можно определить как частоту выхода дислокаций на поверхность контакта  $\lambda$ .

В качестве усредненного параметра частоты выхода дислокаций в зону соединения, применительно к рассматриваемому случаю, целесообразно рассматривать изменение плотности дислокаций  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0$  (где  $\rho_1$  и  $\rho_0$  – плотности дислокаций для двух фиксированных значений степени деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_0$  соответственно):

$$\rho_1 - \rho_0 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{Lb}, \quad (5)$$

где  $L$  – путь движения дислокации.

Путь движения дислокации до барьера и плотность дислокации в металле связаны между собой следующим соотношением [9]:

$$L = \rho^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

или

$$\lambda = \frac{\Delta\rho}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{Lb\Delta t}. \quad (7)$$

Величина  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$  в уравнении (7) принимается малой. Поэтому параметр  $\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$  выражает среднюю скорость деформации для выбранного интервала  $\Delta t$ . Переходя к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$ , можно получить следующее выражение:

$$\lambda = \frac{\dot{\varepsilon}}{Lb}, \quad (8)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации.

На рис. 1 представлен расчетный график зависимости плотности дислокаций  $\rho$  от фиксированных значений степени деформации частицы медного порошка  $\varepsilon$ .

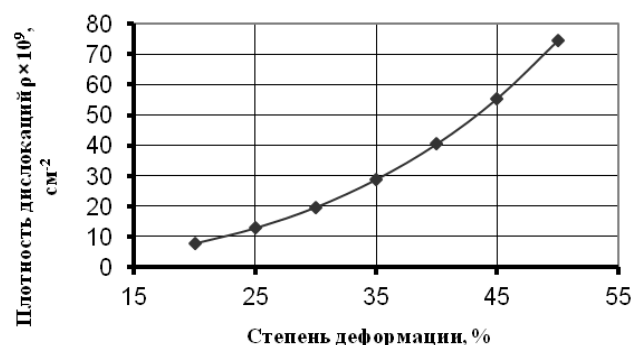


Рис. 1. Изменение плотности дислокаций для частиц медного порошка при пластическом деформировании

Применительно к условиям консолидации частиц медного порошка под воздействием внешних силовых факторов можно принять, что скорость деформации постоянная и определяется по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r}\right)}{t_c}, \quad (9)$$

где  $r_0$  – радиус медной частицы до деформации, мм;  
 $r$  – расстояние от центра частицы до поверхности контакта в момент схватывания атомов контактных поверхностей, мм;  
 $t_c$  – длительность схватывания атомов контактных поверхностей, с.

При обработке порошковых материалов давлением предполагается, что время взаимодействия совпадает со временем активации и не превышает 1-2 с. Принимая значения для параметра  $t_c$  равным 1, 1,5, 2 с и  $\varepsilon = 50\%$ , расчетные значения для скорости деформации составят соответственно  $\dot{\varepsilon}_1 = 0,693 \text{ с}^{-1}$ ,  $\dot{\varepsilon}_2 = 0,462 \text{ с}^{-1}$ ,  $\dot{\varepsilon}_3 = 0,346 \text{ с}^{-1}$ .

Используя полученные значения в формуле (7), можно получить расчетные значения  $\lambda$  при различных скоростях и степенях деформации. Результаты указанных расчетов представлены на рис. 2.

Как видно из полученных зависимостей, с увеличением скорости деформирования порошковых материалов возрастает число активных центров на поверхности частиц, что, в свою очередь, увеличивает площадь физико-химического взаимодействия частиц. Однако следует отметить, что в реальных условиях изготовления изделий из порошковых материалов под действием внешних силовых факторов практический интерес представляет прогнозная оценка прочностных характеристик получаемого материала. В контексте

настоящей работы прочность материала рассматривается как функции состояния межчастичных контактов, которые, в свою очередь, характеризуются числом активных центров на контактной поверхности в порошковой среде.

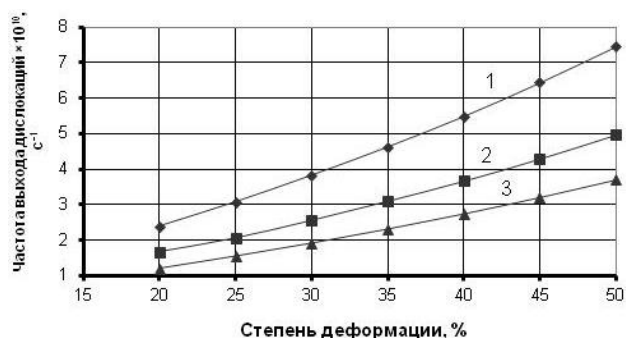


Рис. 2. Частота выхода дислокаций на поверхность частиц при пластической деформации (частота образования активных центров):  
 1 – скорость деформации  $0,693 \text{ с}^{-1}$ ;  
 2 – скорость деформации  $0,462 \text{ с}^{-1}$ ;  
 3 – скорость деформации  $0,346 \text{ с}^{-1}$

Количественно оценить межчастичное взаимодействие возможно по величине относительной прочности соединения  $\sigma_\phi$ , используемой для аналогичной оценки при сварке давлением компактных материалов, которая в общем случае определяется выражением [9]

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma(t)}{\sigma_{\max}}, \quad (10)$$

где  $\sigma(t)$  – прочность соединения в текущий момент времени  $t$  ;

$\sigma_{\max}$  – прочность компактного материала.

В результате ряда математических преобразований и подстановок, выполненных в работе [4], получена аналитическая зависимость для оценки относительной прочности соединения контактных поверхностей взаимодействующих порошковых частиц, которую в первом приближении можно распространить на прочностную характеристику получаемого обработкой давлением порошкового материала:

$$\sigma_\phi = \frac{S \dot{\epsilon} t_c}{Lb}, \quad (11)$$

где  $S$  – площадь активного центра,  $\text{м}^2$ .

При условии, что скорость деформации есть величина постоянная, можно принять следующее выражение:  $\dot{\epsilon} t_c = \epsilon$ . Тогда уравнение (11) запишется в виде

$$\sigma_\phi = \frac{S \epsilon}{Lb}. \quad (12)$$

Принимая, что радиус активного центра составляет  $r \approx 15b$  [7], можно получить, что для частицы меди  $r = 38,1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ , а  $S = 45,58 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$ . Подстановка известных значений в полученные выражения при  $\epsilon = 20\%$  дает  $\sigma_\phi = 35$ . Это означает, что максимальная прочность соединения  $\sigma_\phi = 1$  достигается при значительно меньших деформациях, а это при реальных условиях обработки порошковых материалов давлением невозможно. Поэтому в формулу (12) целесообразно ввести коэффициент  $B$ , предложенный в работе [8] и зависящий от условий образования соединения:

$$\sigma_\phi = \frac{BS \epsilon}{Lb}. \quad (13)$$

При обработке порошковых материалов  $B$  можно определить исходя из того, что относительная прочность порошковых формовок достигает значений  $0,7-0,9$ , а относительная деформация для условий прессования в закрытой пресс-форме –  $50\%$ , тогда  $B = 2,6 \cdot 10^{-3}$ . На рис. 3 представлена оценочная зависимость относительной прочности порошкового материала при различных значениях степени деформации, рассчитанная по формуле (13).

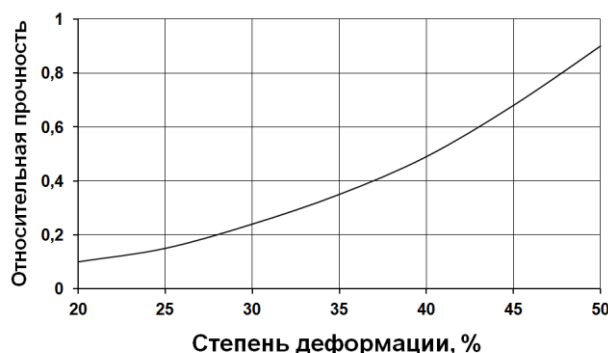


Рис. 3. Зависимость относительной прочности соединения частиц медного порошка от степени деформации

Характер полученных аналитических выражений и графических зависимостей подтверждает развивающиеся представления о ключевой роли деформационно-силового воздействия в оценке контактных межчастичных взаимодействий. С помощью полученного уравнения (13) возможно прогнозирование прочностных свойств получаемых дискретных материалов в зависимости от степени деформации и параметров микросварки давлением, формирующихся при их получении.

### Заключение

Таким образом, при рассмотрении вопроса о соединении порошковых материалов под действием внешних силовых факторов вполне возможно приме-

нение теоретических положений, разработанных для соединения компактных материалов давлением. Одним из ключевых моментов этих положений является образование активных центров взаимодействия на контактных поверхностях деформируемых частиц. Для этого необходимо учитывать особенности деформирования частиц, имеющих разнообразные форму и размеры и находящихся в общей массе прессовки. В ходе работы установлено, что рост прочности порошкового материала может происходить не только в результате его уплотнения под действием гидростатического давления и упрочнения собственно материала-основы, но и в результате явления «схватывания», и предопределяться наличием и реализацией активных центров физико-химического взаимодействия на пятнах действительного контакта взаимодействующих порошковых частиц. Представленные в настоящей статье результаты аналитического исследования и расчетов могут быть полезны и рекомендованы для анализа процессов взаимодействия порошковых частиц при обработке давлением порошковых металлических сред.

#### Список источников

1. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы: пер. с нем./ Б. Финдайзен, Э. Фридрих, И. Калнич и др.; под ред. В. Шатта. М.: Металлургия, 1983. 520 с.
2. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V.E., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. // Vestnik of Novosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). С. 67-69.
3. Самсонов Г.В. Электронная теория спекания // Теория и технология спекания. Киев: Наук. думка, 1974.
4. Мезин И.Ю. Формирование металлоизделий из структурно-неоднородных материалов: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 155 с.
5. Gutmanas E.Y. Cold sintering under high pressure mechanisms and application // P/M-82 Eur. Int. Milano, 1982. P. 627-634.
6. Активация твердофазного диффузионного взаимодействия при формировании сварных соединений: монография / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, П.А. Саблин, В.В. Григорьев. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 368 с. Текст: электронный. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903606>
7. Красулин Ю.Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971. 119 с.
8. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 271 с.
9. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
10. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
11. Ивенсен В.А. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. М.: Металлургия, 1985. 247 с.
12. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. 2-е изд., перераб. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
13. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Металлургия, 1964. 271 с.
14. Ничипоренко О.С., Помосов А.В., Набойниченко С.С. Порошки меди и ее сплавов. Проблемы цветной металлургии. М.: Металлургия, 1988. 206 с.
15. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 360 с.
16. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. М.: Металлургия, 1987. 729 с.
17. Шоршов М.Х., Каракозов Э.С., Мякишев Ю.В. Особенности взаимодействия между соединяемыми металлами под влиянием повышенной температуры и давления // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 6. С. 68-74.
18. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 584 с.
19. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 267 с.

#### Сведения об авторах

**Мезин Игорь Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: i.mezin@magtu.ru.

**Касаткина Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tssa@magtu.ru.

**Понурко Ирина Витальевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tssa@magtu.ru.

**Кургузов Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ksaask@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**EFFECT OF COLD PRESSURE WORKING ON THE ACTIVATION OF CONTACT SURFACES IN METAL POWDER**

**Mezin Igor Yu.** – Dr. Sci. (Tech.), Head of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: i.mezin@magtu.ru.

**Kasatkina Elena G.** – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tssa@magtu.ru.

**Ponurko Irina V.** – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Technologies, Certification and Automobile Service» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tssa@magtu.ru.

**Kurguzov Sergej A.** – Cand. Sci. (Tech.), Assistant Professor of «Machines and technologies for pressure processing and mechanical engineering» Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ksaask@mail.ru.

**Abstract.** In presented paper, cold plastic deforming of porous powder metal materials is considered not only as a changes in shape product technological operation, but also as a process that shapes the material itself, its structure, and properties. The paper examines the physicochemical aspects of the influence of external force factors on the processes of interparticle contact formation in a powder medium. The activation of the contact surfaces of metal particles is analyzed using copper powder as an example, during the formation of products from materials based on it during cold plastic deforming processes. As a result of the completed research, analytical dependencies were proposed and graphs were constructed reflecting the patterns of formation of active centers on the contact surfaces of deformed copper powder particles. Using the obtained dependencies, it is also possible to predict the strength properties of the resulting discrete materials depending on the degree of deformation and the parameters of pressure microwelding during their production. It was established that an increase in the strength of a powder material can occur not only as a result of its compaction and hardening of the base material itself, but also as a result of the phenomenon of solid-phase microwelding, i.e. The presence and realization of active centers at the actual contact spots of powder particles. The presented results can be useful and recommended for analyzing the interaction processes of powder particles during pressure processing of non-compact powder metal materials.

**Keywords:** powder material, cold plastic deformation, activation of contact surfaces, active center, dislocation exit on contact surface frequency, dislocation density, dislocation exit on contact surface energy, relative strength

**References**

1. Powder metallurgy. Sintered and composite materials / B. Findaisen, E. Friedrich, I. Kalnich, et al.; Ed. by V. Shatt: Translated from German. Moscow: Metallurgy, 1983. 520 p.
2. Metallurgy qualimetry theory design and development. / Gun G.S., Rubin G.Sh., Chukin M.V.E., Gun I.G., Mezin I.Yu., Korchunov A.G. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5 (45), pp. 67-69.
3. Samsonov G.V. Electronic theory of sintering // Theory and technology of sintering: Kyiv: Nauk. dumka, 1974. Pp. 10-25.
4. Mezin I.Yu. Formation of metal products from structurally heterogeneous materials: Monograph. Magnitogorsk: MSTU named after G.I. Nosov, 2000. 155 p.
5. Gutmanas E. Y. Cold sintering under high pressure mechanisms and application // P/M-82 Eur. Int. Milano, 1982, pp. 627-634.
6. Activation of solid-phase diffusion interaction during the formation of welded joints: monograph / V.I. Muravyov, P. V. Bakhmatov, P. A. Sablin, V. V. Grigoriev. Moscow; Volgda: Infra-Engineering, 2022. 368 p. Text: electronic. URL: <https://znanium.com/catalog/product/1903606>
7. Krasulin Yu.L. Interaction of a metal with a semiconductor in the solid phase. Moscow: Nauka, 1971. 119 p.
8. Karakozov E.S. Welding of metals by pressure. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 271 p.
9. Karakozov E.S. Connection of metals in the solid phase. Moscow: Metallurgy, 1976. 264 p.
10. Balshin M. Yu. Scientific foundations of powder metallurgy and fiber metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1972. 336 p.
11. Ivensen V.A. Phenomenology of sintering and some theoretical issues. Moscow: Metallurgy, 1985. 247 p.
12. Gromov N. P. Theory of Processing of metal under pressure. 2nd ed., revised. Moscow: Metallurgy, 1978. 360 p.
13. Arkulis G.E. Joint plastic deformation of different metals. Moscow: Metallurgy, 1964. 271 p.
14. Nichiporenko O.S., Pomosov A.V., Naboynichenko S.S. Powders of copper and its alloys. Problems of non-ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1988. 206 p.

15. Osintsev O.E., Fedorov V.N. Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: reference book. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Innovative engineering, 2016. 360 p.
16. Powder metallurgy and spray coatings: Textbook for universities / V. N. Antsiferov, G. V. Bobrov, L. K. Druzhinin et al.; edited by B.S. Mitin. Moscow: Metallurgy, 1987. 729 p.
17. Shorshov M.Kh., Karakozov E.S., Myakishev Yu.V. Features of interaction between joined metals under the influence of elevated temperature and pressure. *Physics and Chemistry of Materials Processing*, 1971, no. 6, pp. 68-74.
18. Van Buren. Defects in Crystals. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1962. 584 p.
19. Cottrell A. H. Dislocations and plastic flow in crystals. Moscow, Metallurgical Publishing House, 1958. 267 p.

---

Ссылка на статью:

Влияние холодной обработки давлением на активацию контактных поверхностей в металлическом порошке / Мезин И.Ю., Касаткина Е.Г., Понурко И.В., Кургузов С.А. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 44-50. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)

Mezin I.Yu., Kasatkina E.G., Ponurko I.V., Kurguzov S.A. Effect of cold pressure working on the activation of contact surfaces in metal powder. *Teoria i tehnologija metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 44-50. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-44-50](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-44-50)