

## Моделирование твердофазного соединения разнородных порошковых слоев при клиновом горячем компактировании

*С.Н. Сергеенко*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** Рассмотрен биметаллический порошковый материал железо-бронза, полученный клиновым горячим компактированием. Сформулирована гипотеза, подтвержденная результатами экспериментальных исследований, об определяющем влиянии объемной деформации порошкового материала железной основы в процессе клинового горячего компактирования. Введено понятие показателя и построена 2D модель Impulse качества консолидации разнородных порошковых слоев от абсолютных значений объемной деформации железной основы. В результате анализа построенной 2D Impulse модели для переходной зоны биметалла, полученного по технологии, включающей спекание, установлено абсолютное значение  $|0,21|$  критической объемной деформации, обеспечивающей переход от удовлетворительного к хорошему качеству консолидации с учетом введенной шкалы качества. Для технологии, не предусматривающей спекание, абсолютное значение  $|0,171|$  критической объемной деформации, равное параметру «с» модели, характеризует переход от неудовлетворительного к удовлетворительному качеству консолидации.

**Ключевые слова:** порошковый, биметалл, моделирование, клиновое горячее компактирование, консолидация, слоистый материал, железо, бронза, твердофазное соединение.

**Введение.** Технологии порошковой металлургии обеспечивают получение композиционных материалов с повышенными физическими и механическими свойствами, недостижимыми традиционными методами, и применяются в различных областях машиностроения [1,2]. Слоистые материалы, состоящие из двух и более слоев разнородных металлов, относятся к композиционным материалам. Применение слоистых композиций позволяет повысить надежность работы оборудования при снижении затрат на цветные металлы и сплавы [3], повысить коррозионную стойкость [4,5].

Эксплуатационные свойства биметаллической композиции превосходят свойства составляющих ее компонентов и определяются их характеристиками, а также прочностью соединения разнородных слоев.

Разработка методов консолидации разнородных материалов является актуальной и малоизученной областью исследований [6]. К перспективным направлениям изучения биметаллов относятся композиты медь-сталь и бронза-сталь [7,8]. При получении нанослоистых композитов используют методы пластической деформации [9].

В работе [10,11] рассмотрены перспективные методы получения многослойных порошковых материалов и комбинированные технологии спекания, совмещенного с инфильтрацией, горячего изостатического прессования с последующей ковкой, осевого прессования с радиальным уплотнением, последовательного СВС-компактирования в радиальном и осевом направлениях. Показана повышенная эффективность формования слоистых заготовок в условиях действия сдвиговых напряжений.

С целью получения высокоплотных порошкового биметалла бронза – железо предложен способ, включающий формование биметаллической заготовки, ее спекание, кратковременный нагрев и горячее доуплотнение клиновидным инструментом [12]. Исследования прочности соединения разнородных слоев биметаллических материалов бронза-железо показали повышенную эффективность технологии клинового горячего компактирования по сравнению с осевой. Увеличение плотности железной основы горячекompактированного биметалла железо-бронза приводит к повышению прочности соединения разнородных слоев [13,14].

Цель работы – установление закономерностей влияния объемной деформации порошковой железной основы на качество консолидации разнородных слоев при клиновом горячем компактировании.

Методика проведения исследований. В качестве исходных материалов использовали железный порошок ПЖВ 2.160.28 и бронзовый порошок БрО10С1,5ЦФ. В работе изучены две технологические схемы. Первый вариант (Т1) получения призматических слоистых образцов для испытаний на срез

---

переходной зоны биметалла включал формование железной основы с пористостью 35%, напрессовку порошка бронзы с последующим спеканием (1123 К, 10,8 кс) слоистой заготовки в защитной среде водорода и клиновое горячее (1123 К, 0,3 кс) компактирование. Второй вариант (Т2) технологии не предусматривал операции спекания. Пористость железной основы биметаллической формовки с напрессованным поверхностным слоем составляла 20 %. Перед кратковременным нагревом слоистую порошковую заготовку покрывали коллоидным графитом, а на рабочую поверхность формующего инструмента клиновидной формы наносили разработанную технологическую смазку на основе графита и дисульфида молибдена.

Результаты исследований. В работе высказана гипотеза об определяющем влиянии объемной деформации  $\varepsilon_v$  порошкового материала железной основы в процессе клинового горячего компактирования на качество консолидации разнородных порошковых слоев. Значения  $\varepsilon_v$  (1) определяли с учетом относительной плотности железной основы биметалла в исходном  $\theta_0$  и горячекompактированного  $\theta_1$  состоянии:

$$\varepsilon_v = \ln \frac{\theta_0}{\theta_1} . \quad (1)$$

Прочность соединения разнородных слоев зависит от температурно-силовых параметров процесса. Твердофазное соединение металлов можно представить, как многостадийный процесс, включающий создание физического контакта двух тел, активацию контактных поверхностей и объемное взаимодействие [15]. Активация контактных поверхностей может быть обеспечена пластическим деформированием. В процессе твердофазного соединения прочный контакт с установлением химических связей формируется в определенных активных центрах. Формирование твердофазного соединения в условиях действия касательных напряжений позволяет снизить время активации контактных поверхностей [16]. В соответствии с принципами

---

теории топохимических реакций [17] изменение прочности соединения определяется скоростью образования и роста очагов взаимодействия. Преобразуя уравнение кинетики роста прочности соединения [18], получим выражение для расчета показателя качества консолидации QC разнородных порошковых слоев (2):

$$QC = \ln [-\ln(1-RS)] \quad (2)$$

где  $RS = (\tau_c / \tau_{\max})$  - относительная прочность.

Относительную прочность RS определили с учетом текущих  $\tau_c$  и полученных максимальных значений предела прочности на срез  $\tau_{\max}$  материала переходной зоны биметалла бронза-железо. Для оценки качества соединения порошковых слоев введем условную шкалу, в зависимости от значений QC:

- $QC < 0$  - неудовлетворительное ( $0 < RS < 0,632$ );
- $0 \leq QC < 1$  - удовлетворительное ( $0,632 \leq RS < 0,934$ );
- $QC \geq 1$  - хорошее ( $0,934 \leq RS < 1$ ).

Закономерности влияния абсолютных значений объемной деформации порошкового материала  $|\epsilon_v|$  железной основы биметалла с бронзовым поверхностным слоем в процессе клинового горячего компактирования (технологии T1, T2) описываются зависимостью Impulse (3) при повышенных значениях коэффициента корреляции (таблица №1):

$$QC = a + b \cdot \left(\frac{|\epsilon_v| - c}{d}\right) \cdot \left(\left|\frac{|\epsilon_v| - c}{d}\right|\right)^{-e} \left(\left|\frac{x - c}{d}\right|\right)^{-e} \quad (3)$$

Таблица №1

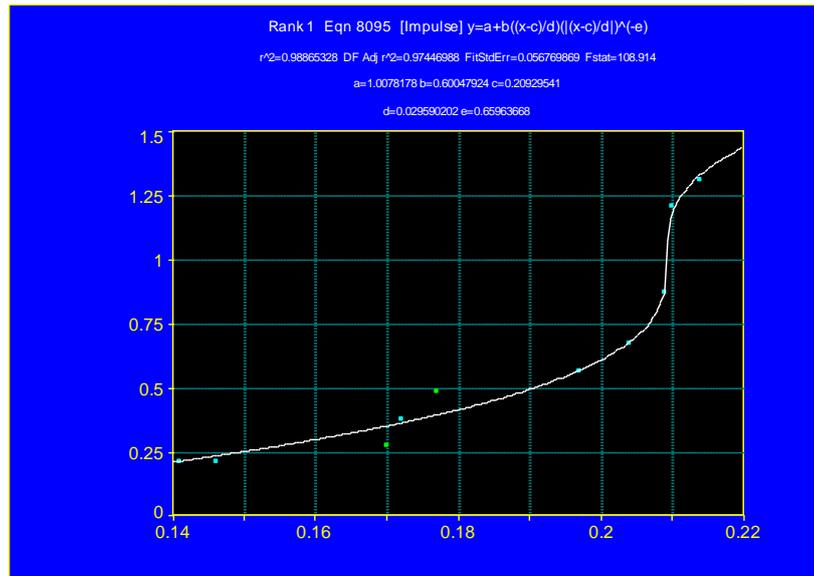
Значения параметров модели Impulse QC( $|\epsilon_v|$ )

Технология	Значения параметров модели Impulse					r
	a	b	c	d	e	
T1	1,008	0,6	0,21	0,03	0,66	0,994
T2	-0,003	0,24	0,171	0,025	0,621	0,934

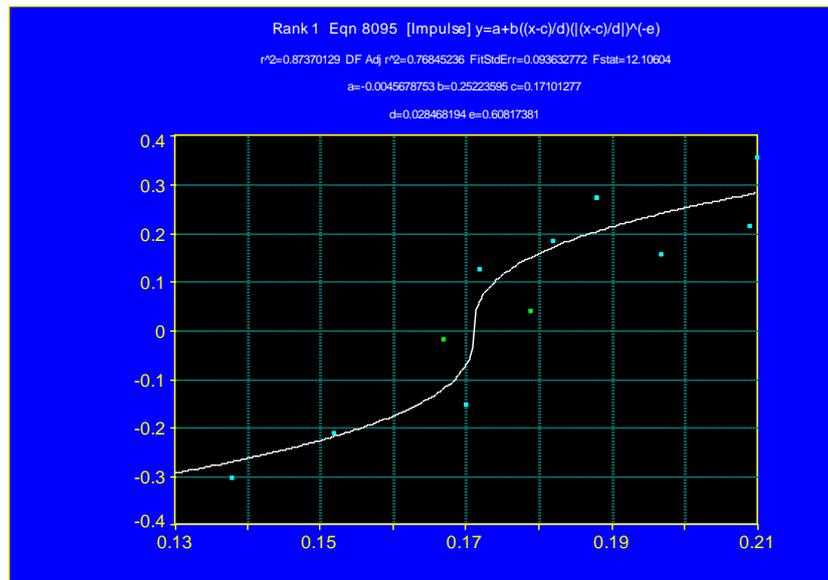
Анализ полученных моделей Impulse QC( $|\epsilon_v|$ ) для переходной зоны порошковых биметаллов бронза-железо показал следующее. Наибольшая степень соответствия полученных моделей Impulse QC( $|\epsilon_v|$ ) расчетным значениям QC наблюдается для технологии T1, включающей спекание биметаллической заготовки с последующим клиновым горячим компактированием со стороны бронзового слоя (таблица №1). Разработанная технология T1 обеспечивает получение порошкового материала с хорошим качества консолидации разнородных порошковых слоев ( $QC > 1$ ). При исключении операции спекания (технология T2), качество консолидации снижается до удовлетворительного ( $QC < 1$ ). На основе проведенных исследований построены графические (рис. 1) модели Impulse QC( $|\epsilon_v|$ ) влияния абсолютных значений объемной деформации материала порошковой железной основы в процессе клинового горячего компактирования на показатель качества соединения разнородных слоев.

Увеличение  $|\epsilon_v|$  приводит к непрерывному повышению значений QC для исследованных технологий T1 и T2. В результате анализа построенных

моделей  $QC(|\varepsilon_v|)$  (рис. 1) для переходной зоны порошкового биметалла бронза-железо, полученного по технологии (Т1, Т2) клинового горячего



а)



б)

Рис. 1 – Графическая модель Impulse ПС( $|\varepsilon_v|$ ) для переходной зоны биметалла, полученного по технологии Т1 а) и Т2 б)

компактирования со стороны бронзового поверхностного слоя, установлены критические абсолютные значения объемной деформации  $|\varepsilon_v^{kp}|$ , равные (таблица 1) параметру «с» модели Impulse (3). Значения  $|\varepsilon_v^{kp}|$  характеризуют переход от удовлетворительного ( $QC < 1$ ) к хорошему ( $QC \geq 1$ ) качеству консолидации разнородных порошковых слоев биметалла Fe-Cu для варианта технологии (Т1) клинового горячего компактирования со стороны бронзового слоя, включающего спекание, и переход ( $|\varepsilon_v^{kp}| = c = 0,171$ ) от неудовлетворительного ( $QC < 0$ ) к удовлетворительному ( $QC \geq 0$ ) качеству консолидации для технологии Т2.

При переходе от технологии Т2, не предусматривающей спекание, к Т1, включающей термическое воздействие в процессе спекания, обеспечивается снижение значений  $|\varepsilon_v|$  необходимых для получения биметалла Fe-Cu с заданным качеством консолидации ( $QC = 0,3$ ). В основе этого явления лежит принцип температурно-деформационной аналогии. В результате проведенных исследований можно предположить о преобладающем действии деформационного механизма консолидации разнородных порошковых слоев.

**Выводы.** Сформулирована гипотеза, подтвержденная результатами экспериментальных исследований, об определяющем влиянии объемной деформации порошкового материала железной основы в процессе клинового горячего компактирования на качество консолидации. Введено понятие показателя и построена 2D-модель Impulse качества консолидации разнородных порошковых слоев от абсолютных значений объемной деформации железной основы.

---

## Литература

1. Дюжечкин М.К., Сергеенко С.Н. Особенности механохимической активации шихты Al-Si и формирования горячедеформированного порошкового материала на её основе // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2377](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2377).
2. Синельщиков В.В., Томилин С.А. Механизм возникновения трещин в осаживаемых нагретых пористых образцах // Инженерный вестник Дона, 2022, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7493](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7493).
3. Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении // Современные проблемы науки и образования, 2015. №2-1. С. 163-163.
4. Saboktakin M., Razavi G. R., Monajati H. The Effect of Copper Interlayer on Metallurgical Properties of Roll Bonding Titanium Clad Steel //International Conference on Advanced Materials Engineering; IACSIT Press: Singapore. 2011. Vol.15, pp. 10-14.
5. Saboktakin M., Razavi G. R., Monajati H. The investigate metallurgical properties of roll bondingtitanium clad steel // International Journal of Applied Physics and Mathematics. 2011. Vol. 1. № 3, pp. 177-180.
6. Khan H.A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B. Roll bonding processes: State-of-the-art and future perspectives //Metals. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1344.
7. Wang Y., Gao Y., Li Y., Zhai W., Sun L., Zhang C. Review of preparation and application of copper–steel bimetal composites // Emerging Materials Research, 2019. Vol. 8, pp. 538-547.
8. Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N., Shishkovsky I.V. Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system //Materials & Design. 2022. Vol. 224. P. 111313.

9. Shahabi H. S., Manesh H. D. Micro-structural evaluation of Cu/Nb nano-layered composites produced by repeated press and rolling process //Journal of alloys and compounds. 2009. Vol. 482. No. 1-2, pp. 526-534.
  10. Сергеев С.Н. Технологии получения многослойных порошковых материалов (обзор) // Технология металлов. 2010. № 11. С. 43-55.
  11. Сергеев С.Н. Технологии получения многослойных порошковых материалов (обзор) // Технология металлов. 2010. № 12. С. 40-51.
  12. Дорофеев Ю.Г., Сергеев С.Н., Симилейский Б.М., Цебииков А.С. Способ изготовления высокоплотных порошковых биметаллических изделий бронза – железо. Патент на изобретение 2090311. Бюллетень. 1997. URL: [new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](http://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet).
  13. Dorofeev Yu.G., Tsebikov A.S., Sergeenko S.N., Simileiskii B.M. Effect of parameters of transverse hot stamping on the quality of shaping and the properties of bimetallic components // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1992. Vol. 30. No. 10, pp. 815-817.
  14. Dorofeev Yu.G., Sergeenko S.N., Tsebikov A.S. Evaluation of the strength of bonds in dissimilar layers of a bimetallic material // Physics and chemistry of materials treatment. 1990. Vol. 24. No.1, pp. 77-78.
  15. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 262с.
  16. Красулин Ю.П. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971. 119с.
  17. Дельмон В. Кинетика гетерогенных реакций. М.: Мир, 1972. 552с.
  18. Шоршоров М.Х., Дрюнин С.С. Кинетика соединения материалов в твердой фазе // Физика и химия обработки материалов. №1. 1981. С.75-85.
-

## References

1. Dyuzhechkin M.K., Sergeenko S.N. Inzhenernyj Vestnik Dona. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2377](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2377).
  2. Sinelshchikov V.V., Tomilin S.A. Inzhenernyj Vestnik Dona, 2022, № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7493](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7493).
  3. Sirotenko L.D., Shlykov E.S., Ablyaz T.R. Modern problems of science and education, 2015. № 2-1. P. 163.
  4. Saboktakin M., Razavi G. R., Monajati H. International Conference on Advanced Materials Engineering; IACSIT Press: Singapore. 2011. Vol.15, pp. 10-14.
  5. Saboktakin M., Razavi G. R., Monajati H. International Journal of Applied Physics and Mathematics. 2011. Vol. 1. No. 3, pp. 177-180.
  6. Khan H.A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B. Metals. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1344.
  7. Wang Y., Gao Y., Li Y., Zhai W., Sun L., Zhang C. Emerging Materials Research, 2019. Vol. 8, pp. 538-547.
  8. Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N., Shishkovsky I.V. Materials & Design. 2022. V. 224. P. 111313.
  9. Shahabi H. S., Manesh H. D. Journal of alloys and compounds. 2009. Vol. 482. No. 1-2, pp. 526-534.
  10. Sergeenko S.N. Tekhnologiya metallov. 2010. No.11, pp. 43-55.
  11. Sergeenko S.N. Tekhnologiya metallov. 2010. No.12, pp. 40-51.
  12. Dorofeev Yu.G., Sergeenko S.N., Simileisky B.M., Tsebikov A.S. Patent for invention 2090311. Sposob izgotovleniya vysokoplotnykh poroshkovykh bimetallicheskich izdelij bronza-zhelezo [Method for manufacturing high-density powder bimetallic products bronze-iron]. Bulletin. 1997. URL: [new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](http://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet).
-

13. Dorofeev Yu.G., Tsebikov A.S., Sergeenko S.N., Simileiskii B.M. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 1992. Vol. 30. No.10, pp. 815-817.

14. Dorofeev, Yu.G., Sergeenko, S.N., Tsebikov, A.S. Physics and chemistry of materials treatment. 1990. Vol. 24. No.1, pp. 77-78.

15. Karakozov E.S. The connection of metals in the solid phase [Connection of metals in the solid phase]. M.: Metallurgy, 1976. 262 p.

16. Krasulin Yu.P. Interaction of a metal with a semiconductor in the solid phase [Interaction of a Metal with a Semiconductor in the Solid Phase]. M.: Nauka, 1971. 119 p.

17. Delmon V. Kinetics of heterogeneous reactions [Kinetics of heterogeneous reactions]. M.: Mir, 1972, 552 p.

18. Shorshorov M.Kh., Dryunin S.S. Fizika i khimiya obrabotki materialov. No.1. 1981, pp.75-85.