

## Исследование пластичности и характеристик плотности трехкомпонентного композита FeNiCu при прокатке

Ю.А. Морозов<sup>1</sup>, Б.Ф. Белелюбский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Московский политехнический университет (Московский Политех)

**Аннотация:** Проводится экспериментальное исследование предельных деформаций трехкомпонентного композита из металлических порошков FeNiCu при прокатке с различными обжатиями, что позволяет оценить параметры пластичности материала, и тем самым исключить различные проявления разрушения (трещины, разрывы, расслоения и пр.). В зависимости от величины деформации и пропорционального содержания отдельных компонентов, определяется относительная плотность композита. Результаты будут востребованы при разработке технологических процессов обработки давлением композитных материалов, в частности получения порошкового проката заданной плотности.

**Ключевые слова:** композит, псевдосплав, обработка давлением, прокатка, пластичность, обжатие, разрушение, расслоение, относительная плотность композита.

Порошковая металлургия обеспечивает наибольшее приближение к форме и размерам композитных деталей, позволяя снизить трудозатраты при последующей механической обработке резанием, что является экономически целесообразным ввиду почти полного отсутствия стружечных отходов. При этом имеется возможность создания конструкционных материалов с уникальными свойствами (псевдосплавы из несплавлиющихся между собой металлов), эксплуатируемых в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температур [1-3].

Однако, в отличие от монометалла, особенностью композитов могут быть пониженные показатели пластичности, связанные с разнородным металлическим составом и механическими характеристиками металлических порошков [4, 5], а также сопутствующими дефектами некачественного шихтования, недостаточной плотностью после компактирования, нарушением режимов спекания и пр.

При правильно выбранных режимах обработки можно добиться весьма существенного улучшения качества с минимальной неоднородностью внутреннего кристаллического строения заготовки.

Исследовалась прокатка трехкомпонентного материала «железо-никель-медь» (Fe50Ni30Cu20) с целью отработки допустимых режимов обжатий, исключающих образования различных видов брака – нарушение сплошности и образование поперечных трещин по ширине раската или разрыва кромок вследствие повышенного обжатия или неравномерной плотности; возникновение внутренних продольных трещин по толщине и расслоение (разделение) раската на две-три части из-за неравномерной пористости по толщине.

Прямоугольные заготовки размером  $51,0 \times 20,5 \times 5,3 \dots 7,6$  мм, спеченные при  $880 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в защитной атмосфере аргона (для исключения окисления частиц порошка внутри скомпактированной заготовки и образования окалины на ее поверхности), прокатывались на лабораторном двухвалковом прокатном стане ДУО130 (рис. 1).

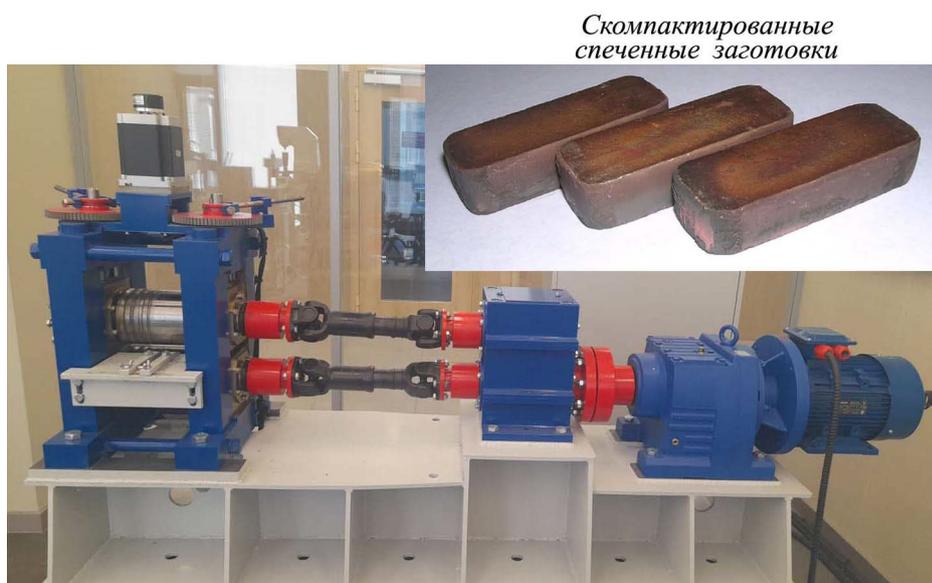


Рис. 1. – Лабораторный двухвалковый прокатный стан ДУО130

Большое внимание уделялось установлению предельных деформаций, вызывающих разрушение материала. Следует отметить, что для каждого эксперимента испытывалось от 3 до 6 заготовок с усреднением их линейных размеров.

Значительное обжатие группы заготовок №1 выполненное за один пропуск  $5,6 \rightarrow 1,6$  мм (71,4%) привело к развитию повышенного уширения  $20,5 \rightarrow 22,8$  мм (11,2%); произошел разрыв раската с образованием трещин по периметру (рис. 2).



Рис. 2. – Экспериментальная прокатка №1 (обжатие 71,4%)

В связи с этим, был изменен режим обжатий и принято решение постепенного (плавного) увеличения деформации (рис. 3) [6]:

- группа №2 обжималась в один проход  $5,5 \rightarrow 4,6$  мм (16,4%);
- группа №3 обжималась в два прохода  $5,9 \rightarrow 3,9$  мм (33,8%).

Таким образом, для обжатия за один проход можно рекомендовать степень деформации, равную 0,16...0,2 (16...20%).

На экспериментальной группе №4 была предпринята попытка двойного увеличения деформации в дополнительном третьем проходе  $6,3 \rightarrow 2,3$  мм (63,5%), что привело к ожидаемому разрыву при уширении  $20,5 \rightarrow 23,4$  мм (14,1%) и подтвердило выводы об режимах обжатия [7].



Рис. 3. – Экспериментальная прокатка №2 ... №4

В последующих экспериментах исследовалось влияние степени деформации на высоту раската (рис. 4):

- группа №5 обжималась 5,4→3,3 мм (38,9%);
- группа №6 обжималась 5,5→3,9 мм (29,1%).

Решение произвести деформацию группы заготовок №7 в два прохода 5,5→3,0мм (45,5%) ожидаемо привело к разрушению материала.



Рис. 4. – Экспериментальная прокатка №5 ... №7

Последующая серия экспериментов проводилась в несколько переходов, с целью более точного определения допустимой степени деформации композитного материала (рис. 5):

- группа №8 обжималась в один проход 4,7→4,3 мм (8,5%);
- группа №9 обжималась в один проход 5,2→4,1 мм (21,2%);
- группа №10 обжималась в два прохода 5,9→4,6 мм (22%);

- группа №12 обжималась в два прохода 4,6→3,4 мм (26,1%);
- группа №13 обжималась в три прохода 5,0→3,0 мм (40%);
- группа №14 обжималась в четыре прохода 4,8→2,5 мм (47,9%);
- группа №16 обжималась в пять проходов 4,8→2,5 мм (47,9%).

Таким образом, при прокатке с повышенными обжатиями критическая деформация разрушения устанавливается близкой к 40%.



Рис. 5. – Экспериментальная прокатка №8 ... №16  
(кроме №11 и №15)

Дополнительно, за счет прокатки в несколько переходов с плавным уменьшением обжатия, предельную деформацию можно повысить до 50%. Например, в эксперименте №16 образец был последовательно продеформирован за пять переходов при отсутствии видимых разрушений.

В ходе проведения исследований не обошлось и без брака, иллюстрирующего особенности производства композитов (рис. 6):

- образец в группе №11 обжимался 5,2→2,3 мм (55,8%) и разрыв возможно произошел из-за некачественного спекания: по всей видимости

деталь оказалась в зоне прямого обдува защитной средой – аргоном, а так как газ перед подачей в печь не подогревается, то не произошло должного прогрева детали, и соответственно ее спекания;

– образец в группе №15 обжимался  $5,1 \rightarrow 2,2$  мм (56,9%) и разрыв произошел из-за очередной попытки сократить количество переходов – в этот раз их было произведено три.



Рис. 6. – Экспериментальная прокатка образцов №11 и №15

В соответствии с правилом аддитивности, согласно пропорциональному содержанию отдельных компонентов и закону их упрочнения, определена относительная плотность композита от давления прокатки (рис. 7) [8, 9].

Результаты моделирующих испытаний, при рекомендуемых режимах прокатки, устанавливают отношение уширения  $\varepsilon_b$  и обжатия  $\varepsilon_h$  раската от относительной плотности материала (рис. 8):

$$\varepsilon_b / \varepsilon_h = 0,4 \bar{\rho} - 0,2 \quad (1),$$

или в пересчете на давление прокатки  $\varepsilon_b / \varepsilon_h = 0,286 \bar{\rho} - 0,17$ .

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлены:

1) критические обжатия композитного материала Fe50Ni30Cu20 в пределах 40...50%;

2) устойчивые обжатия без появления трещин и разрывов раската 16...20%;

3) соотношение параметров очага деформации (1).

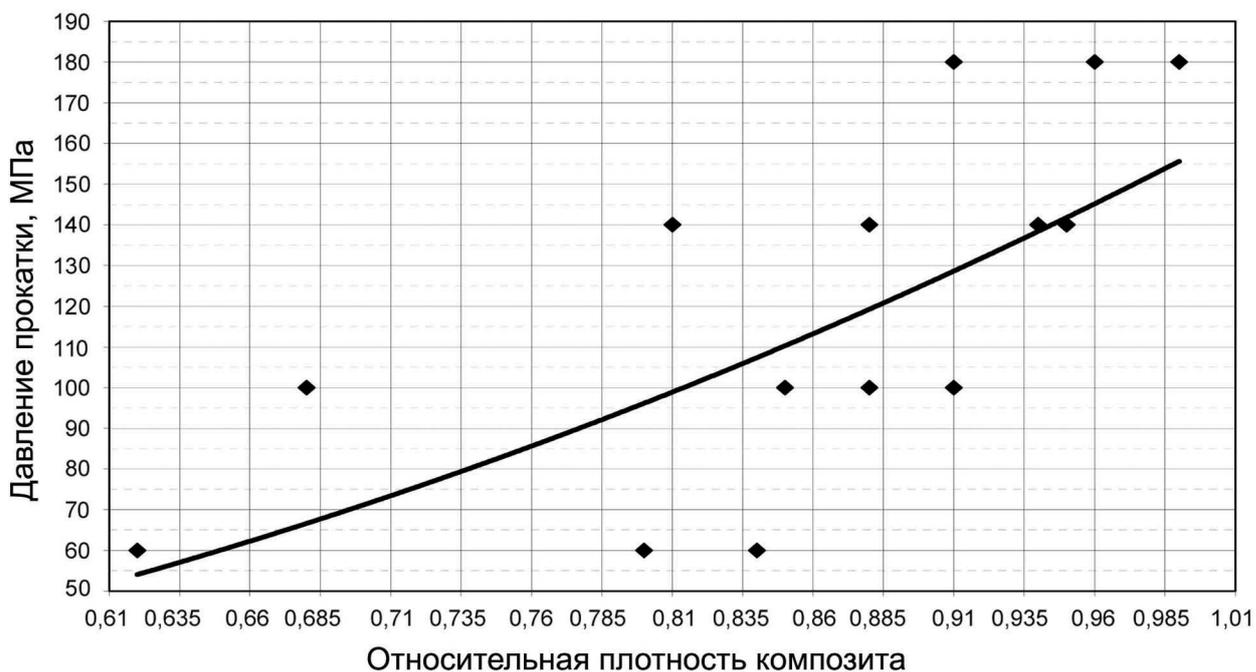


Рис. 7. – Зависимость относительной плотности композита от давления прокатки

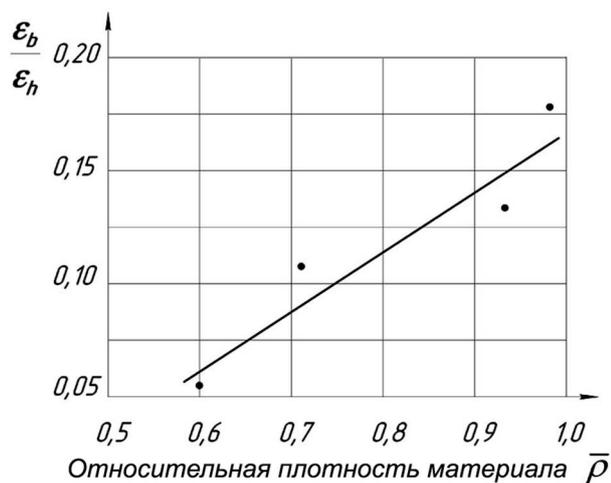


Рис. 8. – Зависимость отношения уширения и обжатия раската от относительной плотности материала

Использование экспериментальных результатов будут востребованы при разработке технологических процессов обработки давлением композитных материалов, в частности получения порошкового проката

заданной плотности [10], а также выборе прокатного оборудования в соответствии с требующимся давлением прокатки.

### Литература

1. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. Т.2. Формование и спекание. М., МИСИС, 2002. 320 с.
2. Наумова Л.Н., Ключев С.В., Аюбов Н.А. Дисперсно-наполненный композит на техническом углероде // Инженерный вестник Дона. 2023. №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8912](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8912).
3. Логинов В.Т., Дерлугян П.Д. Химическое конструирование трибокомпозитов и их производство в ОКТБ «Орион» // Инженерный вестник Дона. 2007. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46).
4. Zegzulka J., Gelnar D., Jezerska L., Prokes R. & Rozbroj J. Characterization and fowability methods for metal powders. Scientific Reports 10, 21004 (2020). URL: [doi.org/10.1038/s41598-020-77974-3](https://doi.org/10.1038/s41598-020-77974-3)
5. Leturia M., Benali M., Lagarde S., Ronga I., Saleh K. Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods. Powder Technology. Vol. 253, February 2014, pp. 406-423. URL: [doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045)
6. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. 385 с.
7. Морозов Ю.А., Белелюбский Б.Ф. Исследование проникающей деформации по толщине полосы при прокатке композитных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Том 22, №8. С. 366-370.
8. Кохан Л.С., Роберов И.Г., Белелюбский Б.Ф., Кондрашов А.А., Павлов В.П. Распределение плотности по толщине заготовки при

компактировании и последующей прокатке // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2005. №2. С. 70-73.

9. Кохан Л.С., Роберов И.Г., Кондрашов А.А., Белелюбский Б.Ф., Шульгин А.В. Определение среднего давления прокатки спеченных скомпактированных заготовок из металлических порошков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. №1. С. 96-101.

10. Кохан Л.С., Пунин В.И., Шульгин А.В., Морозов Ю.А. Производство гнутых слоистых коррозионностойких профилей // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. №2. С. 35-40.

### References

1. Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V. *Protsessy poroshkovoy metallurgii. T.2. Formirovaniye i spekaniye* [Powder metallurgy processes. Vol. 2. Forming and sintering]. Moskva, MISiS, 2002. 320 p.

2. Naumova L.N., Klyuyev S.V., Ayubov N.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2023. №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8912](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8912).

3. Loginov V.T., Derlugyan P.D. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2007. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2007/46).

4. Zegzulka J., Gelnar D., Jezerska L., Prokes R. & Rozbroj J. *Scientific Reports*. 10, 21004 (2020). URL: [doi.org/10.1038/s41598-020-77974-3](https://doi.org/10.1038/s41598-020-77974-3).

5. Leturia M., Benali M., Lagarde S., Ronga I., Saleh K. *Powder Technology*. Vol. 253, February 2014, pp. 406-423. URL: [doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.045).

6. Girshov V.L., Kotov S.A., Tsemenko V.N. *Sovremennyye tekhnologii v poroshkovoy metallurgii* [Modern technologies in powder metallurgy]. St. Peterburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2010. 385 p.

7. Morozov Yu.A., Belelyubsky B.F. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2024. Vol. 22, No. 8. pp. 366-370.



8. Kokhan L.S., Roberov I.G., Beleyubsky B.F., Kondrashov A.A., Pavlov V.P. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2005. №. 2. pp. 70-73.

9. Kokhan L.S., Roberov I.G., Kondrashov A.A., Beleyubsky B.F., Shulgin A.V. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2006. №. 1. pp. 96-101.

10. Kokhan L.S., Punin V.I., Shulgin A.V., Morozov Yu.A. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2014. №. 2. pp. 35-40.

**Дата поступления: 17.08.2025**

**Дата публикации: 26.09.2025**