

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам Лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях ИФПМ СО РАН за помощь в изготовлении материала исследований.

Список использованных источников:

1. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с.
2. Scaling in the Local Strain-Rate Field during Jerky Flow in an Al-3%Mg Alloy / M. Lebyodkin, Y. Bougherira, T. Lebedkina, D. Entemeyer // *Metals*. – 2020. – Vol. 10. – Is. 1. – 134 p.
3. Горбатенко В.В. Неустойчивость пластического течения: полосы Чернова–Людерса и эффект Портевена-Ле Шателье / В.В. Горбатенко, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев // *Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 87. – № 3. – Р. 372–377.
4. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample / V. Utyaganova, A. Filippov, S. Tarasov [et al.] // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 172. – 110867 (12) p.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА ИЗ СТАЛЬНОЙ СТРУЖКИ

Е.Н. Коростелева^{1,2,a}, к.т.н, доц., В.В. Коржова¹, к.т.н.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Россия, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/4

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

E-mail: ^aelenak@ispms.ru

Аннотация: Переработка отходов промышленного производства позволяет решать не только экологические проблемы, но и повторное использование материальных ресурсов. Чаще всего возвращаемые в производство материальные ресурсы стараются использовать в той же технологической нише, где формировались сами отходы через их переплавку или добавление в шихту. В данной работе предлагается альтернативный подход, позволяющий при утилизации стальной стружки получать функциональный порошковый продукт, который можно в дальнейшем использовать при создании порошковых металлматричных композитов. Стружка стали 45 после токарной обработки имеет сложный морфологический вид с неоднородным распределением кислорода и углерода. Дополнительное окисление с последующим измельчением в вибромельнице трансформирует структуру стальной стружки, повышая объемную долю оксидных фаз. Результаты проведенных исследований показали, что полученный порошок из такой переработанной стальной стружки представляет собой фактически металлматричный композитный материал с оксидными включениями на основе железной матрицы, который можно использовать в дальнейшем в разных порошковых технологиях.

Ключевые слова: стальная стружка, измельчение, окисление, структура, оксиды железа, композиционные порошки, спекание.

Abstract: Recycling industrial waste allows us to solve not only environmental problems, but also reuse material resources. Most often, the returned material resources are tried to be used in the same technological niche where the waste itself was formed through their remelting or addition to the charge. This work proposes an alternative approach which allows us to obtain a functional powder product from steel swarf during recycling process, that can be further used in the creation of powder metal matrix composites. Steel 45 shavings after turning have a complex morphological appearance with a non-uniform distribution of oxygen and carbon. Additional oxidation followed by grinding in a vibrating mill transforms the structure of steel swarf, increasing the volume fraction of oxide phases. The results of the studies have shown that the resulting powder from such recycled steel swarf was actually a metal matrix composite with oxide inclusions based on an iron matrix that can be used in the future in various powder technologies.

Keywords: steel swarf, grinding, oxidation, structure, iron oxides, composite powders, sintering.

Введение

В рамках стратегии ресурсоэффективности и утилизации отходов производства предпочтительно использовать технологии порошковой металлургии. Наиболее наглядно это представлено при переработке металлических отходов в машиностроительной отрасли [1, 2]. Значительный вклад в совокупный объем отходов производственных цепочек в машиностроении дает металлообработка на различных станках. Независимо от вида обработки, используемого инструмента, при изготовлении любой детали всегда образуется металлическая стружка. Чаще всего эта стружка утилизируется как металлический лом в металлургических процессах [2, 3]. Отходы металлообработки традиционно рассматривались как ресурсы для повторного использования в процессе либо переплавки, либо как шихта для объемных порошковых заготовок и нанесения покрытий. С другой сто-

роны, «вредные» примеси и загрязнения можно рассмотреть в качестве источников дополнительных элементов для формирования функциональной многокомпонентной структуры в перерабатываемых отходах с их последующим переходом в порошкообразный вид.

Методика исследований

Исходным материалом для исследования были отходы металлообработки стальных заготовок из углеродистой стали 45 как наиболее распространенного сплава в машиностроительных производствах. Стальная стружка была получена на машиностроительном предприятии после операции торцевания без использования СОЖ. Общий вид исследуемой стружки и ее фрагментов, фазовый состав и характерная структура ее поверхности после станочной обработки представлены на рис.1. Стоит отметить, что результаты рентгенофазового анализа (РФА) стружки из стали 45 не выявили линий оксидных фаз и показали практически стандартный набор фаз, характерный для этого сорта стали. Размер фрагментов стружки после обработки стальной заготовки на станке составлял 3–7 мм в ширину и 10–30 мм в длину, поэтому для уменьшения их размеров потребовалось измельчение с использованием вибромельницы. Измельчение проводили в воздушной среде в течение 10 часов в присутствии стальных шаров с диаметром 15 мм при соотношении веса стружки к весу шаров 1:30.

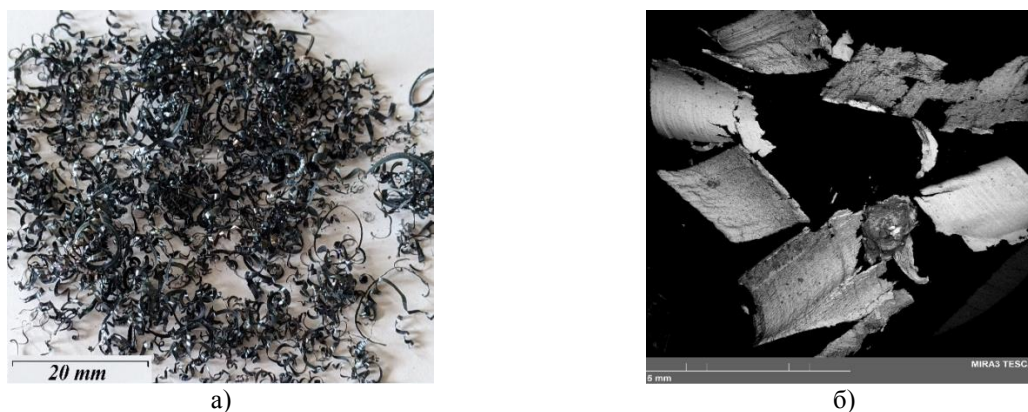


Рис. 1. Общий вид стружки из стали 45 и ее фрагментов (а, б)

Несмотря на условия металлообработки и связанные с этим процессы температурных колебаний, насыщения кислородом и наклепом, стружка оставалась пластичной, что затрудняло процесс дробления. Дополнительное окисление фрагментов стружки повысило их хрупкость и позволило получить порошкообразный материал с широким диапазоном дисперсности частиц от 50 до 350 мкм. Для оценки прессуемости и спекаемости полученного порошка из переработанной стружки стали 45 были спрессованы цилиндрические образцы высотой 10–13 мм с диаметром 10 мм, которые спекали в вакуумной печи в диапазоне температур от 800 до 1200 °С с выдержкой 60 мин.

Исследования исходной стружки и спеченных образцов были проведены с использованием рентгенофазового анализа (РФА), растровой электронной микроскопии (РЭМ) на оборудовании Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН (ДРОН-8, сканирующий электронный микроскоп TESCAN MIRA 3LMU).

Результаты и их обсуждение

Анализ стальной стружки показал, что после металлообработки без использования СОЖ на ее поверхности формируется высокодефектная структура, где элементный анализ показал наличие дополнительного количества кислорода и углерода, но проведенный РФА не зафиксировал оксидные фазы. Можно предположить, что при первичной металлообработке сопутствующие окислительные процессы преимущественно способствуют формированию аморфных оксидных пленок, невидимых для РФА, и не позволяют сформировать кристаллиты оксидов железа в заметном количестве. Поскольку стальная стружка после токарной обработки оставалась пластичной, а содержание оксидных фаз оказалось незначительным, то было принято решение дополнительно окислить фрагменты стружки с целью не только увеличения содержания оксидов железа, но и для повышения хрупкости стружки. Таким образом, процесс окисления позволял решить сразу две задачи – добиться эффективного измельчения стружки и повысить объемное содержание оксидов железа. Вариант окисления связан с наиболее простым и доступным способом выдержки в воде не менее 48 часов. Смачивание водой с последующей сушкой на воздухе при комнатной температуре фрагментов стальной стружки уже через 48 часов позволили зафиксировать методом РФА до 30–40 об. % оксидов железа.

Параллельно рассмотрен вариант получения порошкообразных фрагментов из отходов стружки путем осаждения взвеси продуктов размола стружки стали 45 из воды после ее испарения. После высушивания водяного раствора был получен мелкий порошок, фазовый состав которого показал сложную конфигурацию дигидроксокарбоната железа $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ в присутствии оксидов железа. Поскольку такой порошковый продукт

имел очень сложный состав, требовал отдельного изучения и его продуктивность была существенно ниже, чем при использовании обычного смачивания в воде, сушки и последующего измельчения, то для дальнейших исследований ограничились отсеянным порошком из измельченной стружки после выдержки в воде. Структурно-фазовый и элементный анализ доокисленной и измельченной стружки показал, что фактически в процессе выбранной комплексной обработки с окислением в воде и интенсивным механическим дроблением фрагменты стальной стружки из стали 45 трансформируются в композитный металломатричный порошковый материал, частицы которого состоят из матрицы на основе α -Fe, а включениями являются оксиды железа Fe_2O_3 или Fe_3O_4 . Стружка при дроблении фрагментировалась на частицы в широком диапазоне размеров – от крупных фрагментов 300–350 мкм, до мелких 20–50 мкм. Присутствие заметного количества оксидов (не менее 30 об. %) может вызвать затруднения при компактировании полученного порошка, поэтому для проверки были спрессованы образцы с использованием небольшого давления прессования (до 0,03 МПа) без добавления каких-либо пластификаторов. Остаточная пористость полученных образцов составляла около 40 %.

Последующее вакуумное спекание спрессованных образцов приводит к снижению доли пор на фоне усадки образцов. Структурно-фазовое состояние спеченной при 1000°C прессовки из порошка переработанной стальной стружки представлено на рис. 2. РФА прессовок из порошка стружки после спекания показал, что сформированная после обработки группа оксидов железа $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ переходит в монооксид FeO, а основной фазой является α -Fe (рис. 2, а). Зона межчастичных контактов в большей степени наполнена оксидными компонентами, тогда как основная область частиц практически свободна от кислорода (рис. 2, в, г). Такая конфигурация элементов структуры сдерживает спекание фрагментированных частиц стальной стружки за счет препятствия в виде оксидсодержащей периферии. Протяженные области, насыщенные кислородом, в частицах порошка из переработанной стальной стружки являются открытыми зонами для контактного взаимодействия с другими порошковыми компонентами, например, алюминием или титаном [4–6], и могут участвовать в сопутствующих реакциях восстановления или синтеза интерметаллидов, что является отдельной темой исследований. Стоит отметить, что сформированное структурно-фазовое состояние переработанной до порошкообразного вида стальной стружки может быть интересно в контексте других перспектив использования [7], где актуально присутствие оксидов железа.

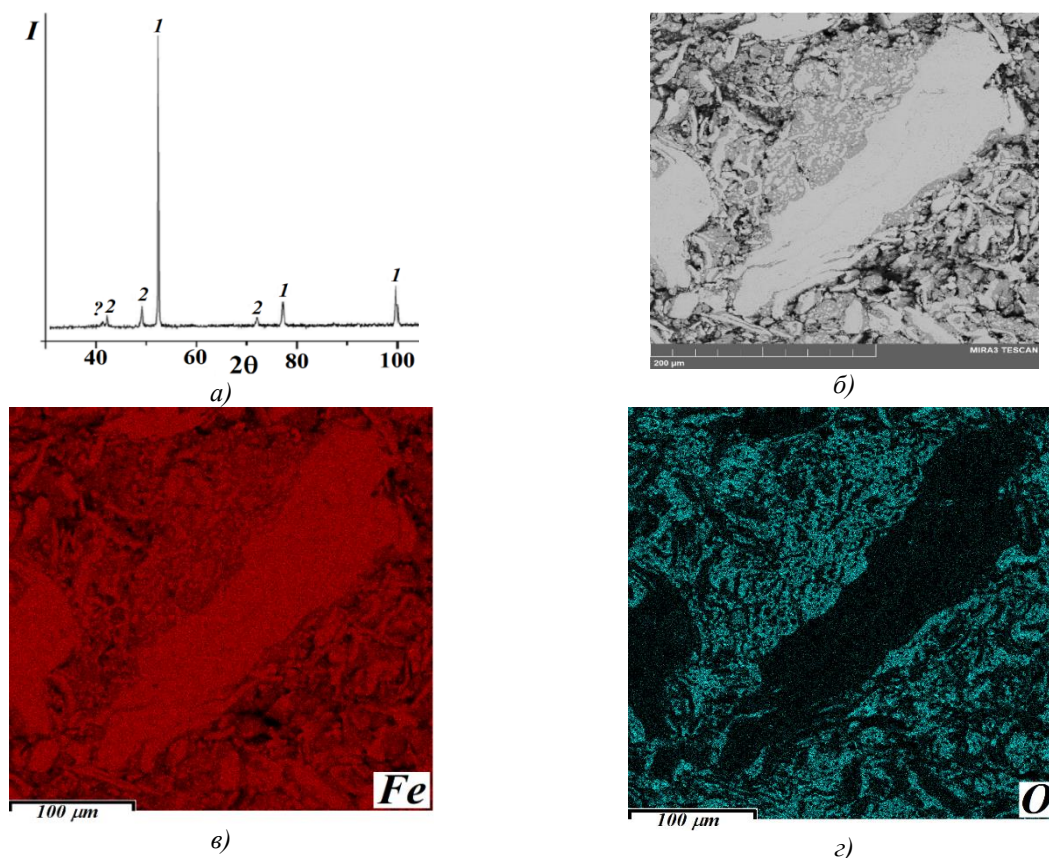


Рис. 2. Фазовый состав (а, 1 – α -Fe; 2 – FeO), микроструктура (б) и распределение элементов (в, Fe) и (г, O) в спеченной при 1000 °C прессовке из порошка переработанной стальной стружки

Заключение

Стальная стружка после токарной обработки заготовок из стали 45 претерпевает специфические структурные изменения вследствие деформационных и физико-химических процессов, которые обуславливают повышение содержания углерода и кислорода в стальной основе. Привнесенное в процессе металлообработки дополнительное количество кислорода, является недостаточным, чтобы сформировать протяженные области оксидов железа, заметные для РФА. Дополнительное окисление отходов металлообработки в воде способствует повышению содержания оксидной фазы и облегчает процесс измельчения стружки в вибромельнице до получения частиц с размером 50–350 мкм. Анализ полученных порошков из измельченной и обработанной стружки стали 45 показал, что частицы порошка представляют собой металломатричный порошковый продукт с оксидными включениями, который несмотря на присутствие оксидов железа не менее 30 об. %, хорошо прессуется и спекается, демонстрируя объемную усадку и сокращение пористости. Формируемые на поверхности измельченных фрагментов стружки, протяженные области оксидных фаз являются активными структурными включениями, которые могут взаимодействовать с дополнительными порошковыми компонентами, содержащими другие элементы, например, алюминий или титан. Таким образом исследуемый порошок из стальной стружки можно рассматривать, как потенциальный прекурсор или оксид-содержащий компонент для получения многокомпонентных металломатричных композитов с оксидной фазой с использованием отходов машиностроительного производства.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0005.

Список использованных источников:

1. Ровин С.Л. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство / С.Л. Ровин, А.С. Калиниченко, Л.Е. Ровин // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 45–48. – DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-45-48.
2. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy / T. Ottink, N. Viecei, M.R.StJ. Foreman, M. Petranikova // Resources, Conservation and Recycling. – 2022. – Vol. 185. – P. 106450. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106450.
3. Hankel J. Development of a recycling strategy for grinding sludge using supersolidus liquid phase sintering / J. Hankel, S. Jager, S. Weber // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 263. – P. 121501. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121501.
4. Коростелева Е.Н. Особенности формирования структуры спеченных порошковых материалов с использованием отходов металлообработки стальных заготовок / Е.Н. Коростелева, И.О. Николаев, В.В. Коржова // Обработка металлов. – 2022. – Т. 24. – № 4. – P. 192–205. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-192-205.
5. Фазообразование в реакционных порошковых смесях (Al-Fe-Fe₂O₃) при наличии конкурирующих стадий / Е.Н. Коростелева, А.Г. Князева, В.В. Коржова [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 317–330. – DOI: <https://doi.org/10.62669/17270227.2024.3.27>.
6. Коростелева Е.Н. Синтез и эволюция структурно-фазового состояния порошковых материалов Al-Fe-Fe₂O₃ в условиях нагрева / Е.Н. Коростелева, И.О. Николаев, А.В. Барановский // Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену. – 2024. – С. 746–749. – URL: <https://www.itmo.by/conferences/abstracts/mif-17/mif17-proceedings.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
7. Ильин А.А. Получение оксида железа из металлических порошков / А.А. Ильин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2019. – № 62 (5). – С. 62–70.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

М.К. Марцева, ассистент

Юргинский технологический институт (филиал)

Национального исследовательского Томского политехнического университета

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

E-mail: mkm3@tpu.ru

Аннотация: В данной статье рассмотрены основные свойства и структура металломатричных композитов, технологические методы и перспективы их получения.

Ключевые слова: Металломатричные композиты, механоактивация, механолегирование, механохимический синтез, порошковая металлургия.

Abstract: This article discusses the basic properties and structure of metal matrix composites, technological methods and prospects for their production.