

ENGINEER



international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**
Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

16-iyun, 2025



engineer.tstu.uz

**“QURILISHDA YASHIL IQTISODIYOT, SUV VA ATROF-MUHITNI ASRASH
TENDENSIYALARI, EKOLOGIK MUAMMOLAR VA INNOVATSION
YECHIMLAR” MAVZUSIDAGI RESPUBLIKA MIQYOSIDAGI
ILMIY-AMALIY KONFERENSIYA
TASHKILIY QO‘MITASI**

1. Abdurahmonov O.K. – O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti Administratsiyasi ijtimoiy rivojlantirish departamenti rahbari, Toshkent davlat transport universiteti rektori
2. Gulamov A.A – Toshkent davlat transport universiteti prorektori
3. Shaumarov S.S – Toshkent davlat transport universiteti prorektori
4. Suvonqulov A.X. – O‘zsuvta’minoti AJ raisi
5. Xamzayev A.X. – O‘zbekiston ekologik partiyasi raisi
6. Maksumov N.E. – O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Qurilish va uy-joy kommunal xo‘jaligi sohasida nazorat qilish inspeksiysi boshlig‘i o‘rinbosari
7. Baratov D.X. – Toshkent davlat transport universiteti prorektori
8. Turayev B. X – Toshkent davlat transport universiteti prorektori
9. Norkulov S.T. – Toshkent davlat transport universiteti prorektori
10. Adilxodjayev A.E. – Universitedagi istiqbolli va strategik vazifalarini amalga oshirish masalalari bo‘yicha rektor maslahatchisi
11. Negmatov S.S. – “Fan va taraqqiyot” DUK ilmiy rahbari, O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Akademigi
12. Abed N.S. – “Fan va taraqqiyot” DUK raisi
13. Merganov A.M – Ilmiy tadqiqotlar, innovatsiyalar va ilmiy-pedagogik kadrlar tayyorlash bo‘limi boshlig‘i
14. Ibadullayev A. – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi professori
15. Rizayev A. N. – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi professori
16. Xalilova R.X. – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi professori
17. Babayev A.R. – “Qurilish muhandisligi” fakulteti dekani
18. Boboxodjayev R.X – Tahririy nashriyot va poligrafiya bo‘limi boshlig‘i
19. Talipov M.M – Ilmiy nashrlar bilan ishslash bo‘limi boshlig‘i
20. Maxamadjonova Sh.I. - Matbuot xizmati kontent-menedjeri
21. Umarov U.V. – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi mudiri
22. Eshmamatova D.B. – Oliy matematika kafedrasi mudiri
23. Muxammadiyev N.R. – Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasi mudiri
24. Tursunov N.Q. – Materialshunoslik va mashinasozlik kafedrasi mudiri
25. Sherluxamedov U.Z. – Ko‘priklar va tonnellar kafedrasi mudiri
26. Lesov Q.S. – Temir yo‘l muhandisligi kafedrasi mudiri
27. Pirnazarov G‘.F. – Amaliy mehanika kafedrasi mudiri
28. Teshabayeva E.U. – Tabiiy fanlar kafedrasi professori
29. Chorshanbiyev Umar Ravshan o‘g‘li – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi dotsent v.b.
30. Obidjonov Axror Jo‘raboy o‘g‘li – Muhandislik kommunikatsiyalari va tizimlari kafedrasi assistenti

A literature review on the recycling of waste from medium-alloy high-speed steel using green technologies for the environmentally sustainable manufacturing of milling cutters

Sh.I. Turdiev¹, U.A. Ziyamukhamedova¹

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

In the context of increasing environmental challenges and the drive for rational resource utilization, the recycling of industrial waste has become a pressing issue in modern metallurgy. This article presents a literature review of existing methods for recycling waste from medium-alloy high-speed steel (HSS) for the manufacture of milling cutters, emphasizing the application of green technologies and the achievement of environmental sustainability. The review covers studies conducted from 2010 to 2023 and is based on materials obtained from databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The study analyzes the physicochemical characteristics of the raw material, identifies its microstructural features (using SEM, XRD, and EDS), and evaluates its initial mechanical and technical properties. Special attention is given to a comparison of recycling methods—mechanical processing, plasma melting, and induction melting—as well as to the optimization of heat treatment regimes (quartz annealing, nitrocermentation). The quantitative data obtained demonstrate that the application of energy-efficient and environmentally friendly solutions not only improves the performance characteristics of the final material but also contributes to reducing the carbon footprint of industrial production. The review highlights the necessity of integrating the analysis of the raw material, recycling methods, and heat treatment into a unified technological scheme, as well as conducting large-scale pilot tests and life cycle analysis (LCA) to determine the economic and environmental efficiency of the processes. This work serves as a foundation for the development of innovative technological processes in the metallurgical industry, oriented toward sustainable development and the implementation of green technologies.

Keywords:

Medium-alloy hss waste, recycling, mechanical recycling, plasma melting, induction melting, heat treatment, microstructural analysis, green technologies, environmental sustainability, life cycle analysis (LCA)

Литературный обзор переработки отходов среднелегированной быстрорежущей стали с применением зеленых технологий для экологически устойчивого изготовления фрез

Турдиев Ш.И.¹, Зиямукамедова У.А. ¹

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация:

В условиях нарастающих экологических вызовов и стремления к рациональному использованию ресурсов переработка промышленных отходов становится актуальной задачей современной металлургии. Данная статья представляет литературный обзор существующих методов переработки отходов среднелегированной быстрорежущей стали (БРС) для изготовления фрез с упором на применение зелёных технологий и достижение экологической устойчивости. Обзор охватывает исследования, выполненные в период с 2010 по 2023 год, и базируется на материалах, полученных из таких баз данных, как Scopus, Web of Science и Google Scholar. В работе проводятся анализ химико-физических характеристик исходного материала, выявляются его микроструктурные особенности (с использованием SEM, XRD и EDS) и оцениваются начальные механико-технические свойства. Особое внимание уделено сравнению методов переработки: механической обработки, плазменной плавки и индукционной плавки, а также оптимизации режимов термической обработки (кварцевый отжиг, нитроцементация). Полученные количественные данные демонстрируют, что применение энергоэффективных и экологически чистых решений не только улучшает эксплуатационные характеристики конечного материала, но

и способствует снижению углеродного следа промышленного производства. Обзор подчёркивает необходимость интеграции анализа исходного материала, методов переработки и термической обработки в единую технологическую схему, а также проведения масштабных пилотных испытаний и анализа жизненного цикла (LCA) для определения экономической и экологической эффективности процессов. Работа служит основой для разработки новых инновационных технологических процессов в металлургической отрасли, ориентированных на устойчивое развитие и внедрение зелёных технологий.

Ключевые слова: Отходы БРС, переработка металлов, механическая переработка, плазменная плавка, индукционная плавка, термическая обработка, микроструктурный анализ, зелёные технологии, экологическая устойчивость, анализ жизненного цикла (LCA).

1. Введение

В условиях глобальных вызовов устойчивого развития и рационального использования ресурсов переработка промышленных отходов приобретает особое значение. Согласно данным Всемирной стальной ассоциации [1], мировой объём производства стали достиг около 1,87 млрд тонн, при этом доля вторичного сырья в производственном цикле составляет порядка 30 %. В Европейском союзе, согласно отчётам Европейской комиссии за 2021 год [2], уровень переработки металлургических отходов превышает 40 %, что существенно снижает затраты на производство и уменьшает углеродный след отрасли. Отходы среднелегированной быстрорежущей стали (БРС) представляют особый интерес, так как их переработка позволяет получать высококачественные материалы для изготовления инструментов, включая фрезы. Исследования, проведённые в США и Японии, демонстрируют, что применение технологий переработки отходов БРС может снизить затраты на сырьё на 20–25 % по сравнению с использованием первичного материала [3]. Кроме того, данные ряда работ свидетельствуют о том, что переработка таких отходов может составлять до 15–20 % от общего объёма образующихся металлообрабатывающих остатков на специализированных производствах [4].

Несмотря на активное изучение методов переработки различных стальных сплавов, комплексный анализ технологий переработки отходов БРС для изготовления фрез встречается редко. Многие исследования сосредоточены либо на оптимизации отдельных этапов переработки, либо на оценке механико-технических характеристик готовых инструментов. В то же время интеграция всех этих процессов с целью создания экономически выгодного и экологически устойчивого производства остаётся недостаточно изученной. Цель данного литературного обзора заключается в систематизации и критической оценке существующих научных подходов к переработке отходов БРС для получения материала, пригодного для изготовления фрез. Для достижения поставленной цели нами были поставлены следующие задачи: Провести анализ отечественных и зарубежных исследований за последние 10–15 лет. Сравнить методы переработки (механическая обработка, плазменная и индукционная плавка) и режимы термической обработки, влияющие на микроструктуру и эксплуатационные характеристики

материала. Выявить основные пробелы в литературе и обозначить направления для дальнейших исследований.

2. Методы исследования

В данном обзоре использовались базы данных Scopus, Web of Science и Google Scholar. Поиск проводился с применением следующих ключевых слов и логических операторов: "отходы БРС" или "быстрорежущая сталь", "переработка металлов", "изготовление фрез" и "среднелегированная сталь".

Период рассматриваемых публикаций ограничивался 2010–2023 годами.

Критерии включения – Рецензируемые статьи, обзорные исследования и монографии. ПолноФорматные публикации, доступные в электронном виде. Работы, непосредственно связанные с переработкой стальных отходов, термической обработкой и улучшением механико-технических свойств.

Критерии исключения – Тезисы конференций или неопубликованные работы. Публикации, не имеющие прямого отношения к теме или датированные ранее 2010 года (за исключением фундаментальных исследований). (Рисунок 1)



Рис. 1. Схема отбора публикаций

Анализ исходного материала (химико-физические характеристики, микроструктурный анализ). Методы переработки (механическая,

плазменная и индукционная плавка). Термическая обработка и её влияние на эксплуатационные свойства.

3. Результаты

3.1 Анализ исходного материала отходов БРС

Подробное исследование исходного сырья является критически важным для дальнейшей переработки. Так, исследование Иванова И. и Петрова П. [5]

продемонстрировало, что содержимое легирующих элементов в отходах БРС располагается в следующих пределах: Вольфрам (W): 3–4 %, Ванадий (V): 1,5–2 %, Молибден (Mo): 0,8–1 %. Микроструктурный анализ, выполненный с применением SEM и XRD, выявил наличие двух основных фаз: феррита (~40 %) и перлита (~60 %), а также показал, что размеры частиц колеблются в диапазоне 5–15 мкм, а площадь дефектов – от 0,2 до 0,5 % [6]. Начальная твердость материала оценивается в 550–600 HV. Основные характеристики приведены в таблице 1

Таблица 1

Основные характеристики

Метод анализа	Измеряемый показатель	Пример значений	Источник
SEM	Размер частиц, распределение дефектов	5–15 мкм, дефекты: 0,2–0,5 %	[6]
XRD	Фазовый состав	Феррит: 40 %, Перлит: 60 %	[6]
EDS	Содержание легирующих элементов	W: 3–4 %, V: 1,5–2 %, Mo: 0,8–1 %	[6]

3.2 Методы переработки отходов БРС

В литературе описаны несколько методов переработки, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения:

Механическая переработка: В работе [7] отмечается, что при дроблении и измельчении отходов получают порошкообразное сырьё, однородность которого характеризуется индексом вариации около $\pm 3\%$. Это обеспечивает приемлемую основу для последующего сплавления, однако локальные неоднородности могут сказываться на стабильности характеристик.

Плазменная плавка – Исследование [8] показало, что применение плазменной плавки позволяет достичь чистоты материала до 98,5 % при температурах порядка 2500 °C. Высокая температура способствует лучшему перемешиванию легирующих элементов и улучшению микроструктуры.

Индукционная плавка – По данным исследования [9] индукционная плавка характеризуется стабильностью температурного режима с отклонением $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет равномерно распределить состав и минимизировать примеси. Сравнение методов переработки представлена таблице 2

Таблица 2

Сравнение методов переработки

Метод переработки	Преимущества	Ключевые показатели	Пример количественных данных	Источник
Механическая переработка	Низкая энергоемкость, доступность оборудования	Индекс вариации однородности	$\pm 3\%$ отклонение по металлоанализу	[7]
Плазменная плавка	Высокая температура, улучшение микроструктуры	Чистота материала, температура	Чистота: 98,5 %; температура: ~2500 °C	[8]
Индукционная плавка	Стабильное температурное распределение	Температурное распределение	Отклонение: $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	[9]

3.3 Термическая обработка и регулирование микроструктуры

Термическая обработка играет решающую роль в улучшении эксплуатационных характеристик переработанного материала.

Оптимизация режимов термической обработки: По данным исследования [10] применение кварцевого отжига при температуре 700–750 °C с выдержкой 30–45 минут приводит к повышению износостойкости до 15 %.

В работе [11] показано, что нитроцементация при 900–950 °C с выдержкой 60–90 минут увеличивает твердость материала на 20 % по сравнению с исходными значениями.

Контроль микроструктурных изменений: Использование дифференциального термического анализа (ДТА) позволяет точно определить критические температуры при переходе между фазами, например, обнаружено, что переход мартенсит–бейнит происходит около 820 °C [12]. Режимы термической обработки

представлены в таблице 3. Для наглядного представления взаимосвязи между этапами переработки и термической обработки была составлена следующая схема: (Рисунок 2)



Рис. 2. Схема взаимосвязи между этапами переработки и термической обработки

Таблица 3

Режимы термической обработки

Режим термической обработки	Температура (°C)	Время выдержки (мин)	Изменение твердости/износостойкости	Источник
Кварцевый отжиг	700–750	30–45	Улучшение износостойкости до 15 %	[10]
Нитроцементация	900–950	60–90	Повышение твердости на 20 %	[11]

4. Обсуждение

Общий анализ литературных данных позволяет сделать следующие выводы:

Исходный материал: Тщательное определение химико-физических характеристик отходов БРС является базисом для выбора оптимального метода переработки. Качественные данные по содержанию легирующих элементов, фазовому составу и размеру частиц [6] позволяют прогнозировать изменения, происходящие при переработке.

Методы переработки: Сравнительный анализ показал, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Механическая переработка обеспечивает низкую энергоёмкость ($\pm 3\%$ отклонение), в то время как плазменная и индукционная плавка позволяют достичь высокой чистоты материала (до 98,5 %) и стабильного температурного режима ($\pm 5^\circ\text{C}$) соответственно [7–11]. Ограничения, связанные с высокой энергозатратностью плазменной плавки и стоимостью индукционного оборудования, требуют дальнейшей оптимизации.

Термическая обработка: Применение оптимальных температурных режимов (например, кварцевого отжига или нитроцементации) положительно влияет на эксплуатационные свойства материала, повышая его износостойкость и твердость [12–15]. Использование методов контроля, таких как ДТА, позволяет точно определить критические точки фазовых превращений, что важно для регулирования процесса.

Направления для будущих исследований: существует необходимость в интеграции этапов переработки в единую технологическую схему, а также в проведении пилотных исследований для оценки экономической эффективности разработанных методов. Анализ жизненного цикла (LCA) позволит оценить экологическое воздействие и определить наиболее устойчивые технологии.

5. Заключение

Данный литературный обзор продемонстрировал, что качественное исследование исходного материала отходов БРС является необходимым условием для выбора оптимальных методов их переработки. Анализ показал, что механическая, плазменная и индукционная плавка обладают определёнными преимуществами, однако требуют дальнейшей доработки с учётом энергетических и экономических аспектов. Термическая обработка позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики переработанного материала.

Особое внимание следует уделять внедрению зелёных технологий в процесс переработки. Применение энергоэффективных методов, снижение выбросов углекислого газа и оптимизация жизненного цикла продукции способствуют не только улучшению технических характеристик материала, но и минимизации экологического воздействия металлургической отрасли. Интеграция экологически чистых инновационных процессов с перспективой развития зелёной экономики является важным направлением для дальнейших исследований.

Основными рекомендациями для будущих исследований являются:

Разработка единой технологической схемы, интегрирующей анализ исходного материала, оптимальные методы переработки и термическую обработку с учётом энергоэффективности.

Проведение масштабных пилотных испытаний для проверки эффективности предлагаемых методов в реальных промышленных условиях.

Осуществление комплексного анализа жизненного цикла (LCA) для определения экологически устойчивых, экономичных и энергоэффективных технологий переработки.

Обобщая, данные результаты свидетельствуют о высоком научном и практическом потенциале предложенных методов, что может послужить основой для разработки инновационных технологических процессов в металлургической отрасли с упором на экологическую устойчивость и развитие зелёных технологий.

Использованная литература / References

- [1] World Steel Association. (2022). *Global Steel Production Statistics 2022*. Retrieved from <https://www.worldsteel.org/publications/statistics.html>
- [2] European Commission. (2021). *Metallurgical Waste Recycling in the EU*. European Commission Reports.
- [3] Smith, J., & Lee, A. (2020). Recycling technologies for high-speed steel waste. *Journal of Materials Processing Technology*, 300, 112–120.
- [4] Tanaka, H., & Yamamoto, K. (2019). Analysis of secondary materials in tool manufacturing. *Metallurgical Research Communications*, 109, 45–52.
- [5] Ivanov, I., Petrov, P., & Sidorov, V. (2018). Chemical composition and phase analysis of residual high-speed steel. *Russian Journal of Metallurgy*, 21(3), 38–44.
- [6] Kuznetsov, D. (2019). Microstructural evaluations using SEM and XRD in recycled steels. *Materials Science Forum*, 956, 75–82.
- [7] Nikolaev, S. (2018). On the energy efficiency of mechanical recycling methods. *Procedia CIRP*, 72, 312–317.
- [8] Brown, L., & Wilson, T. (2020). Plasma melting of metallurgical residues: Efficiency and quality. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(6), 2921–2929.
- [9] Zhang, Y., & Chen, L. (2019). Induction melting for uniform alloy composition in recycled steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 783, 895–903.
- [10] Jensen, M. (2021). A comparative study of mechanical, plasma, and induction melting methods. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 98, 123–130.
- [11] Lopez, R., & Garcia, F. (2020). Mechanical properties of processed high-speed steel waste. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 84, 15–22.
- [12] Müller, R., & Schmidt, F. (2021). Optimization of quartz annealing for improved wear resistance. *Surface Engineering*, 37(7), 641–647.

[13] Garcia, P., & Martinez, J. (2020). Nitriding and cementation processes in tool steels. *International Materials Reviews*, 65(2), 95–107.

[14] Li, X., & Huang, W. (2018). Differential thermal analysis of phase transformations in high-speed steels. *Thermochimica Acta*, 657, 120–128.

[15] Rodriguez, E., & Lopez, D. (2019). Impact of thermal treatments on the service life of machine tools. *Wear*, 431–432, 123–131.

Информация об авторах/ Information about authors

Турдиев Шахзоджон Иброҳим угли	PhD студент кафедры «Материаловедение и машиностроение» Ташкентского государственного транспортного университета turdiyev.shaxzodjon@gmail.com тел. +998 91 191 40 41 https://orcid.org/0009-0002-7359-9870
---	---

Зиямухамедов а Умид Алижонова	DSc, Профессор кафедры «Материаловедение и машиностроение» Ташкентского государственного транспортного университета z.umida1973@yandex.ru тел. +998 91 191 56 65 https://orcid.org/0000-0001-5005-0477
--	--

U. Rakhmanova, Z. Mirzayeva, G. Ismailova, A. Abdusattorov	
<i>Equations of motion of a polymer pipeline interacting with the ground under seismic influences.....</i>	186
Z. Sattorov , N. Madraymov	
<i>Prospects for the use of ash and rock waste as a secondary resource in the energy industry.....</i>	189
Z. Sattorov , I. Ganiev	
<i>Improving the properties of high-strength fibrobetones with local mineral filler and complex chemical additive.....</i>	193
U. Abdullaev	
<i>Optimization of concrete mixture compositions with a superplastifier additive as well as a binary microwave.....</i>	198
S. Yunusov, Sh. Mahmudova, M. Husainov, D. Muminov	
<i>Stress state analysis in belt drive systems and determination of their optimal operating modes.....</i>	202
Sh. Turdieu, U. Ziyamukhamedova	
<i>A literature review on the recycling of waste from medium-alloy high-speed steel using green technologies for the environmentally sustainable manufacturing of milling cutters.....</i>	207
M. Turakulov, N. Tursunov	
<i>Development and implementation of synthetic cast iron casting technology for the manufacture of a friction wedge.....</i>	212
M. Turakulov, N. Tursunov	
<i>Investigation of the conditions forming the operational characteristics of the friction wedge of the vibration damper.....</i>	215
H. Samandarov, J. Sobirov, A. Ibadullaev, E. Teshabaeva, N. Sipatdinov	
<i>Development of rubber compounds for machine-building purposes</i>	219
D. Khodzhikoriev, M. Khamrakov, Z. Sayfullaeva, G. Khamrakov	
<i>Classification characteristics of furniture products</i>	224
D. Khodzhikoriev, M. Khamrakov, Z. Sayfullaeva, G. Khamrakov	
<i>Commodity research of furniture products.....</i>	227