

УДК 669.716

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТИТАНОВОЙ СТРУЖКИ В ГОТОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ БЕЗ ПЕРЕПЛАВА МЕТАЛЛА

Новицкая И.С., студентка гр. М6О-302БВ-23, III курс

Микова А.А., студентка гр. М6О-305БВ-23, III курс

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)"
г. Москва

Введение. Основным фактором определяющим активное внедрение в промышленных масштабах той или иной технологии производства является экономический эффект от внедрения данной технологии. Причем, чем выше этот эффект, тем большее количество предприятий решит вопрос о скорейшем внедрении новой технологии. Кроме того, большое значение имеет вопрос о первоначальных инвестициях в основное производственное оборудование и производственные площади для реализации предлагаемых технологических процессов. Чем выше первоначальные затраты на оборудование, тем, в современных реалиях, менее охотно предприятия идут на внедрение технологий.

Титановые сплавы, в частности, такие сплавы как ВТ3-1, ВТ6 и ВТ22, являются стратегическими материалами и широко используются в аэрокосмической, судостроительной и медицинской отраслях благодаря сочетанию малой плотности, высокой удельной прочности материала, коррозионной стойкости и биологической совместимости с организмом человека. Однако высокая стоимость конечных изделий обусловлена не только дорогостоящим сырьем, но и низким коэффициентом использования материала (КИМ), который при механической обработке (токарная обработка, фрезерная обработка, строгание, сверление) часто не превышает 25-30%. Основная масса металла заготовки (~ 70-80 %) переходит в отходы, главным образом, в виде стружки. Традиционный путь утилизации такой стружки – переплав в вакуумных дуговых печах (ВДП) – является крайне энергоемким. При этом потери металла на угар составляют 15-40% и приводит к загрязнению сплава различными посторонними элементами и включениями. В связи с выше изложенным, в последнее время, наблюдается активное развитие технологий переработки стружки в готовые изделия минуя стадию переплава [1]. Разработка и внедрение в промышленных масштабах подобных технологий представляет актуальную научно-техническую и экономическую задачу. Целью данной работы является количественная оценка экономической эффективности подобных технологий переработки для стружки конкретных марок титановых сплавов.

Исследование состояния вопроса. До того как начать проводить оценку экономической эффективности внедрения технологий переработки титановой стружки без переплава необходимо проанализировать ежегодные возобновляемые ресурсы в виде стружки, их объемы воспроизводства и проанализировать современные технологии ее переработки. Известно, что объемы образования титановой стружки напрямую связаны с масштабами производства изделий из титановых сплавов и коэффициентом использования металла (КИМ). В Российской Федерации ежегодное образование отходов титановых сплавов оценивается в десятки тысяч тонн [2]. Флагманами по объемам образующейся стружки титановых сплавов являются предприятия авиационного двигателестроения, предприятия космического машиностроения, предприятия оборонной промышленности, предприятия военного судостроения и т.д. На предприятиях, преобразовывающих поковки и штамповки в готовые детали для авиадвигателей, масса стружки может достигать 70-80% от веса исходной заготовки. Конкретно, по наиболее широко распространенным маркам титановых сплавов, можно отметить:

- Титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) – это наиболее распространенный сплав. Полученная стружка составляет основной объем отходов при фрезеровании заготовок лопаток и дисков авиационных двигателей, элементов оперения, элементов топливных систем [3].

- Титановый сплава ВТ3-1 (Ti-6,5Al-2Mo-1,5Zr-0,3Si) в основном применяется для деталей, к которым предъявляются требования по повышенной теплостойкости и жаростойкости. При механической обработке высокая прочность приводит к увеличению усилий резания и образованию "свивной" (т.е. крайне завитой и закрученной) стружки.

- Титановый сплава ВТ22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) представляет собой высокопрочный штампуемый сплав. Необходимо отметить, что отходы в виде стружки данного сплава образуются при механической обработке, в основном, крупногабаритных штамповок дисков газотурбинных двигателей (ГТД) [4].

Целесообразно отметить, что накопление стружки на предприятии создает логистические и экологические проблемы. Ее хранение требует дополнительных площадей, а из-за пирофорности пыли и мелкой стружки титановых сплавов существует риск ее возгорания в условиях контакта с кислородом O_2 окружающей атмосферы.

Все технологии переработки стружечных отходов титановых сплавов можно разделить на две группы (рис.):

1. Технологии переработки с переплавом металла. Данные технологии включают в себя такие операции как: дробление, брикетирование, прессование в электроды, вакуумно-дуговая переплавка (ВДП) или плазменно-дуговой переплав для получения слитка, который затем подвергается деформационной обработке (ковка, прокатка) и механической обработке. Это базовый, но довольно затратный путь. Известно, что традиционная переплавка, как упоминалось выше, экономически и технологически нерациональна.

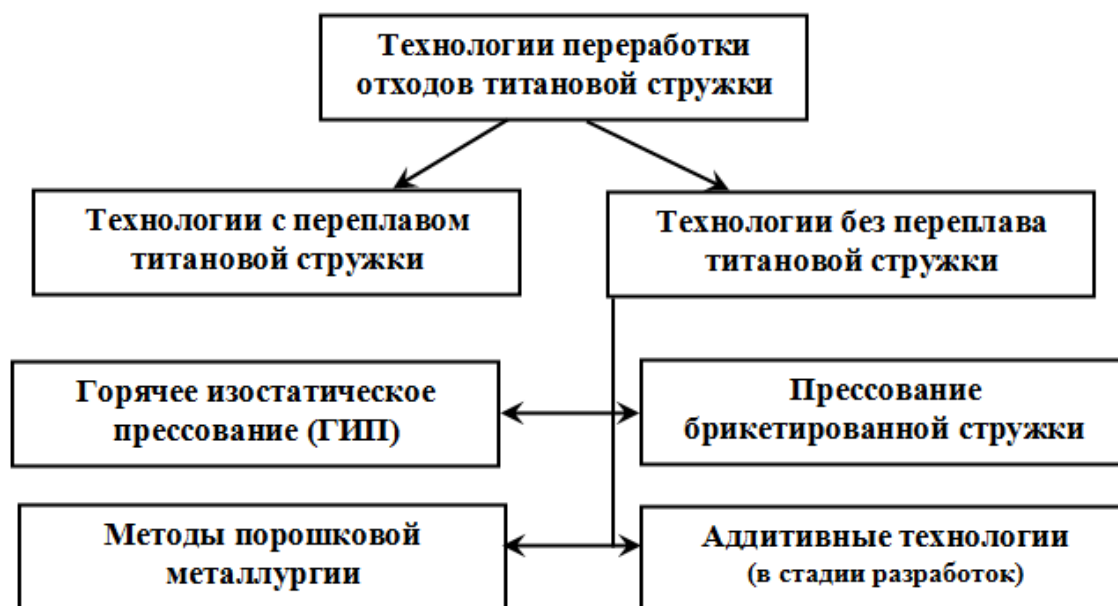


Рисунок 1 – Классификация методов переработки стружечных отходов титановых сплавов [5, 6]

2. Технологии переработки без переплава металла. Данные технологии направлены на консолидацию стружки в компактный, плотный материал без доведения стружечной массы до температуры плавления. Технологии данной группы включают в себя:

1. Горячее изостатическое прессование (ГИП). Данная технология подразумевает, что титановая стружка очищается, сортируется, засыпается в контейнер из мягкой стали, который вакуумируется и запаивается. Затем под действием высокого давления (100-200 МПа) и температуры (850-950 °С) происходит диффузионное сваривание частиц в монолитную заготовку [5].

2. Прессование стружки. В этом случае предварительно уплотненный пакет из очищенной и промытой стружки подвергается горячей экструзии через очко прессовой матрицы, что приводит к значительной пластической деформации металла и сопровождается получением прутков или профилей из компактного материала [6].

3. Технологии порошковой металлургии, разработанные на основе фрагментированной (размолотой) стружки. При этом стружка измельчается в порошок (методом механического размола), а затем используется по классическим технологиям порошковой металлургии, а именно по технологической схеме "прессование + спекание" или ГИП порошков [5, 6].

4. Аддитивные технологии (3D-печать). В настоящее время предлагаются методы использования фрагментированной гранулированной стружки в качестве сырья для лазерного или электронно-лучевого сплавления в установках для селективного лазерного плавления (SLM) или электронно-лучевой плавки (EBM) [6].

Для переработки стружки титановых сплавов наиболее технологически и экономически обоснованным является метод горячего изостатического

прессования (ГИП) стружки [7]. Технологическая цепочка данного метода включает в себя следующие операции:

1. Сбор и сепарацию титановой стружки: Разделение стружки по маркам сплавов (ВТЗ-1, ВТ6, ВТ22 и т.д.) представляет собой критически важный этап рассматриваемой технологии.

2. Очистку стружечных отходов, которая представляет собой удаление масел, эмульсий и абразивов химической или термической (вакуумный отжиг, нагрев с выдержкой) обработкой.

3. Дробление стружки, то есть приведение ее фракций к однородному размеру частиц.

4. Заполнение и вакуумирование контейнера. Контейнер делается из мягкой, относительно дешевой стали. Он служит формой и передает давление при прессовании [7].

5. Горячее изостатическое прессование. Режимы обработки подбираются под конкретный сплав (например, для сплава для ВТ6 имеем: $T = 900-950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 100-150\text{ МПа}$, $t = 2-4\text{ ч}$).

6. Удаление оболочки (контейнера), которое выполняется механическим способом (токарная или фрезерная обработка).

7. Окончательная механическая обработка полученной заготовки [7, 8, 9].

Данный метод позволяет сохранить исходный химический состав сплава (нет угара легирующих элементов), избежать макро- и микроликвации, получить мелкозернистую структуру с улучшенными механическими свойствами [9, 10].

Методология проведения расчетов. Методология проведения расчетов основана на определении экономической экономии при реализации разных технологических процессов, при учете того факта, что на выходе они позволяют получить равное количество компактного материала, одинакового качества и в виде полуфабрикатов примерно одинаковых размеров.

Экономический эффект ($\mathcal{E}$) складывается из разности приведенных затрат по сравниваемым вариантам и дополнительного дохода. Также определение экономического эффекта возможно на основе расчета снижения себестоимости (ΔC) изготовления 1 тонны готовой продукции [11, 12, 13].

Проведение расчетов и обсуждение полученных результатов. На первом этапе исследований необходимо определить основные составляющие экономии по категориям затрат. Определение экономии затрат ведется, как правило, по качественному принципу:

- $\mathcal{E}_1$ – Экономия на сырье. В случае использования технологий без переплава металла исключаются потери металла на угар (5-10%) и потери металла в прибыльную часть слитка (15-25%). Для получения готовых полуфабрикатов в этом случае используется до 95-98% массы стружки [14].

- $\mathcal{E}_2$ – Экономия на энергозатратах. В данном случае исключается наиболее энергоемкая операция – ВДП (максимальный расход электроэнер-

гии, расход электродов, использование дорогостоящего вакуумного оборудования). Затраты на ГИП на 40-60% ниже чем на ВДП.

- $\mathcal{E}_3$ – Сокращение длительности технологического цикла, в связи с тем, что исключаются стадии плавки, механической обдирки слитка. Цикл сокращается на 50-70%.

- $\mathcal{E}_4$ – Повышение выхода годного продукции, так как из заготовки, полученной методом ГИП, можно получить детали с более высоким КИМ за счет близости формы полуфабриката к форме готового изделия [15].

Теперь можем провести предварительную оценку годового экономического эффекта при переработке 1000 кг стружки сплава ВТ6.

Потери при переплавке (10% на угар + 25% на удаление прибыльной части слитка) составляют 350 кг. Стоимость потерь при цене 1 кг сырья принятым 150 руб./кг составляет 52 500 руб. Энергозатраты на переплав 1000 кг стружки составляют 50 000 руб./т. Тогда, прямая экономия ($\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$) только на этих статьях составляет 102,5 тыс. руб./т. в год на 1000 кг стружки. Добавление экономии по статьям $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_4$ увеличивает экономический эффект.

Теперь проведем определение себестоимости изготовления 1 тонны продукции по технологиям с расплавом металла и без расплава.

Условные исходные данные: Стоимость 1 кг стружки как сырья – 150 руб./кг. Тариф на электроэнергию – 8,46 руб./кВт·ч.

Технология с переплавом (ВДП):

1. Сырье (стружка) для получения 1 т слитка: $1 \text{ т} / 0,75 = 1,333 \text{ т}$. Затраты: $1,333 \text{ т} \times 1000 \times 150 \text{ руб./кг} = 199\,950 \text{ руб./т}$.

2. Энергозатраты на переплав (около 6000 кВт·ч/т слитка): $6000 \times 8,46 = 50\,760 \text{ руб./т}$.

3. Амортизация основного оборудования, зарплата основных производственных рабочих, накладные расходы (рассчитывается укрупнено как принятое 150% от п. 2). Имеем 76 140 руб./т.

4. Итого себестоимость 1 т слитка надлежащего качества из переработанной стружки: $199\,950 + 50\,760 + 76\,140 = 326\,850 \text{ руб.}$

5. Себестоимость 1 т готовой продукции (готовых деталей) из слитка (с учетом дальнейшей деформации и механической обработки, при которых суммарный КИМ равен 0,25) составляет $326\,850 / 0,25 \approx 1\,307\,400 \text{ руб./т}$.

Теперь определим себестоимость переработки без переплава (по технологии ГИП) с получением 1 т готовой продукции.

1. Исходное сырье (стружка) для получения 1 т прессовки (выход годного примерно ~ 0,95): $1 \text{ т} / 0,95 = 1,053 \text{ т}$. Затраты: $1,053 \text{ т} \times 1000 \times 150 \text{ руб./кг} = 157\,950 \text{ руб./т}$.

2. Энергетические затраты на ГИП (около 2500 кВт·ч/т слитка): $2500 \times 8,46 = 21\,150 \text{ руб./т}$.

3. Амортизация основного оборудования, зарплата основных производственных рабочих, накладные расходы (рассчитывается укрупнено как принятое равным 150% от п. 2). Имеем 31 725 руб./т.

4. Затраты на производство контейнера, его удаление и его утилизацию. Принимаем, согласно данным планово-финансового отдела машиностроительного предприятия равным 42 500 руб.

5. Итого себестоимость 1 т полуфабрикатов надлежащего качества из переработанной стружки составляет: $157\,950 + 21\,150 + 31\,725 + 42\,500 = 253\,325$ руб./т.

5. Себестоимость 1 т готовой продукции (готовых деталей) из полуфабриката (с учетом механической обработки, при которых суммарный КИМ равен 0,5 (за счет того, что форма полуфабриката максимально приближена к готовому изделию)) составляет $253\,325 / 0,5 \approx 506\,650$ руб./т.

Проведя сравнительный анализ полученных результатов можем утверждать, что себестоимость 1 тонны готовой продукции, полученной из стружки сплава ВТ-6 методом ГИП ($\sim 506\,650$ руб./т) более чем в 2,6 раза ниже, чем при традиционной технологии переработки титановой стружки с переплавом ($\sim 1\,307\,400$ руб./т.).

Если сравнивать стоимость слитка ВТ6 весом 1 т из переработанной стружки ($\sim 326\,850$ руб.) со стоимостью слитка весом 1 т из первичного титана, которая составляет 1 020 000 руб. [16, 17], имеем еще более ощутимую экономию в $\sim 1\,020\,000/326\,850 \approx 3,12$ раза.

Для более дорогих сплавов ВТ3-1 и ВТ22 абсолютный экономический эффект будет еще выше.

По итогам проведенных исследований и расчетов можно сделать следующий комплекс выводов и рекомендаций:

1. Технологии переработки титановой стружки (применительно к сплавам ВТ3-1, ВТ6, ВТ22) методами, исключаящими переплав, в частности, горячим изостатическим прессованием (ГИП), являются технически осуществимыми и позволяют получать заготовки с удовлетворительными механическими свойствами.

2. Ключевым экономическим преимуществом данных технологий является радикальное снижение потерь дорогостоящего металла (с 25-40 % до 2-5 %) и исключение энергоемкой стадии вакуумно-дугового переплава.

3. Проведенный сравнительный расчет себестоимости показал, что производство 1 тонны готового изделия из стружки методом ГИП может быть более чем в 2 раза дешевле традиционной технологии переработки стружки через переплав и последующую деформацию слитка. Для годового объема переработки в 10 тонн экономический эффект в виде экономии на себестоимости продукции может превышать 8,0 млн. руб.

4. Внедрение технологий переработки титановой стружки без переплава металла способствует не только повышению экономической эффективности предприятий, но и решению экологических задач за счет создания малоотходных производственных циклов.

5. Для массового внедрения необходима разработка и стандартизация технологических регламентов для каждой марки сплава, а также создание систем гарантированного сепарирования и очистки стружки от инородных

включений и остатков смазочно-охлаждающих жидкостей на машиностроительных предприятиях.

Заключение. В результате проведенного анализа проблем образования отходов титановых сплавов в виде стружки на машиностроительных предприятиях рассмотрены современные технологии переработки стружки в готовые изделия, сделан акцент на методы, исключаящие стадию переплава (методы порошковой металлургии, метод ГИП, аддитивные технологии и др.). Проведен сравнительный анализ себестоимости изготовления продукции традиционным методом с переплавом металла стружки и методом, базирующимся на механизме образования твердофазного соединения при высокотемпературной деформационной обработке брикета стружки. На основе расчетов для сплава ВТ6 доказана существенная экономическая эффективность технологий деформационной переработки стружки, проявляющаяся в значительном снижении энергетических затрат и повышении выхода годного получаемого продукта.

Определено, что себестоимость 1 тонны готовой продукции, полученной из стружки сплава ВТ-6 методом ГИП (~ 506 650 руб./т) более чем в 2,6 раза ниже, чем при использовании традиционной технологии переработки титановой стружки с переплавом (~ 1 307 400 руб./т.). Для годового объема переработки в 10 тонн экономический эффект в виде экономии на себестоимости продукции может превышать 8,0 млн. руб. Для более дорогих сплавов ВТ3-1 и ВТ22 абсолютный экономический эффект будет еще выше.

Список литературы:

1. Черезов Н.П., Алымов М.И. Эффективный способ получения титанового порошка из стружки комбинированием методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и термического дегидрирования // Авиационные материалы и технологии. – 2026. – № 1(82). – с. 66-77. doi: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-66-77.
2. Костыгова Л.А. Кругооборот титана в промышленности Российской Федерации // Экономика в промышленности. – 2013. – № 1. – с.53–57.
3. Жаров М. В. Анализ характера течения металла при изготовлении авиационных панелей из различных групп алюминиевых сплавов методами изотермической штамповки // Физика и химия обработки материалов. – 2024. № 1. – с. 41-52. doi: 10.30791/0015-3214-2024-1-41-52.
4. Lui E.W. , Palanisamy S., Dargusch M.S., Xia K. Effects of chip conditions on the solid state recycling of Ti-6Al-4V machining chips // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 238. – pp. 297-304. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.028.
5. Жаров М.В. Влияние водородного пластифицирования стружки титановых сплавов на особенности ее пластической деформации // Металлург. – 2025. – № 6. – с. 47-53. doi: 10.52351/00260827_2025_6_47.
6. Гиршов В.Л., Пучков В.И., Красовский А.В. Получение вторичного титана из стружки // Металлообработка. – 2002. – № 3(9). – с. 36-39.

7. Жаров М. В. Исследование влияния уплотнения и термокомпрессионной обработки на качество компактного материала, полученного переработкой отходов из титановых сплавов без переплава // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104. – № 3. – с. 218-224. doi: 10.36652/0042-4633-2025-104-3-218-224.

8. Букин Ю.М., Мещеряков А.Н., Павленко А.А. Импульсное брикетирование титановой стружки для последующей переработки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 4. – с. 25-27.

9. Жаров М. В. Новые технологии переработки стружечных отходов титановых сплавов без переплава металла с получением готовых изделий // Металлург. – 2024. – № 8. – с. 109-116. doi: 10.52351/00260827_2024_8_109.

10. Topolski K. Analysis of densification and consolidation during the solid-state recycling of high purity titanium chips // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – No 31. – pp. 5382-5391. doi: 10.1007/s11665-022-06704-9.

11. Жданов Э. Р., Харина О.С., Козлов Е.Ю. Математические инструменты определения стоимости производственного процесса наукоемкого изделия // СТИН. – 2026. – № 2. – с. 21-28.

12. Боташева Л.С., Кубекова А.Н., Тамбиева А.Х. Учет затрат и калькулирование себестоимости по объектам учета // Индустриальная экономика. – 2024. – № 2. – с. 143-147. doi: 10.52351/00260827_2024_8_109.

13. Наугольнова И.А. Теоретические и методологические основы управления затратами на производство высокотехнологичной и инновационной продукции // Теоретическая и прикладная экономика. – 2018. – № 1. – с. 25-34.

14. Жаров М.В., Преображенский Е.В. К вопросу достоверности результатов математического моделирования процесса штамповки в системах инженерных расчетов // Технология металлов. – 2025. – № 9. – с. 9-19. doi: 10.31044/1684-2499-2025-0-9-9-19.

15. Жаров М.В. Система автоматизированного управления работой термоупругих прессов: решение проблемы инерционности системы // Автоматизация в промышленности – 2021. – № 4. – с. 31-36. doi: 10.25728/avtprom.2021.04.07.

16. Официальный сайт металлургической компании "Металлгорсталь". Электронный ресурс. <http://metallgorstal.ru/catalog/prod/slitok-titanovyuy-360-vt6>. Дата обращения: 23.04.2026.

17. Официальный сайт металлургической компании "Металл-Союз". Электронный ресурс. <http://metalsklad.ru/titanovyij-slitok/slitok-titanovyij-vt6>. Дата обращения: 23.04.2026.