

УДК 669.716

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСШТАБА ОБЪЕМОВ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ В ВИДЕ СТРУЖКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

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. Одной из наиболее серьезных проблем современного машиностроительного производства является проблема утилизации и переработки отходов, образующихся в процессе производства. Особенно остро эта проблема стоит в отраслях авиа- и вертолетостроения, авиационного двигателестроения, в отрасли производства космических аппаратов, при производстве ракет, как гражданского, так и военного назначения и т.д. Это обусловлено, в первую очередь, высокой стоимостью конструкционных материалов, которые используются при производстве деталей современных летательных аппаратов и деталей их двигателей. К ним относятся дорогостоящие жаропрочные и жаростойкие никелевые сплавы, титановые сплавы, специальные стали, применяемые для изготовления силовых конструкций планера самолета или корпуса ракет. Ввиду высокой стоимости этих материалов недопустима простая утилизация отходов путем вывоза отходов на специализированные полигоны (свалки).

Рост производства авиационной и космической техники однозначно ведет к увеличению отходов производства в виде стружки и лома используемых материалов. Это относится и к титановым сплавам, которые активно используются в авиастроении ввиду их высокой прочности и малой плотности, что крайне важно для получения прочных, и в тоже время, легких по весу изделий авиа- и двигателестроения (лопатки турбин и компрессоров авиационных двигателей, элементы топливных систем, элементы подачи воздуха, элементы крепежа, детали конструкций и т.д.) [1].

Исследование состояния вопроса. Титановые сплавы, в первую очередь такие сплавы как ВТ5, ВТ6 (Ti-6Al-4V), ВТ3-1, ВТ20, ВТ22 и др. являются фундаментальными конструкционными материалами для высокотехнологичных отраслей промышленности, в том числе и для авиастроения. Их производство и последующая обработка связаны со значительными материальными и энергетическими затратами. Известно, что низкий коэффициент использования материала (КИМ) при механической обработке, часто составляющий 25-35%, приводит к тому, что большая доля этих дорогостоящих ма-

териалов переходит в отходы, представленные преимущественно в виде стружки [2].

В условиях бурного роста мировых цен на титановое сырье (в первую очередь на губчатый титан, ильменитовые концентраты, как основу для производства титана), в связи с ростом цен на энергоносители и усиления экологических требований, актуальной задачей становится не просто оценка, а точный учет и вовлечение этих отходов в повторный хозяйственный оборот. Существующие традиционные методы переработки стружечных отходов титановых сплавов в полуфабрикаты и готовые изделия, включающие в себя операции очистки стружки, ее сепарацию, брикетирование в холодном состоянии, переplав и отливку полуфабриката характеризуются большими процентами безвозвратных потерь металла при сгорании части стружки и высокими энергетическими затратами на ее переработку. В последнее время активно развиваются альтернативные способы переработки отходов в виде титановой стружки, основанные на формировании устойчивого твердофазного соединения между фрагментами стружки в условиях глубокой деформационной переработки металла [3].

Для определения объемов годной для переработки стружки необходимо сначала рассмотреть рынок мирового производства и потребления титановых сплавов как основу для определения масштабов отходов [4].

В период 2023-2024 гг. мировой рынок титановых сплавов (в пересчете на чистый металл титан) оценивается в 180-220 тысяч тонн ежегодно. Основными потребителями являются:

- аэрокосмическая промышленность: объемы потребления составляют 45-50% от всего мирового потребления (в первую очередь это гражданское и военное авиастроение, двигателестроение, производство космических аппаратов и т.д.);
- химическая промышленность: 25-30% (в первую очередь химическое приборостроение, производство опреснительных установок и т.д.);
- энергетика и энергетическая промышленность (производство теплообменников и т.д.);
- производство медицинских товаров: 8-10% (производство хирургических инструментов, изготовление имплантатов);
- судостроение для нужд военно-морских сил: 5-8%;
- прочие отрасли (автоспорт, архитектура, производство потребительских товаров): 5-10% [5, 6, 7].

Географически потребление титановых сплавов сконцентрировано в США, Европе, Китае и России. Производство полуфабрикатов (слитки, прокат, поковки) осуществляется компаниями: VSMPO-AVISMA (РФ), TIMET (США), ATI (США), BaoTi (Китай) и др. [4, 6, 7, 8].

Необходимо помнить, что не весь произведенный титан проходит стадию интенсивной механической обработки, генерирующей стружку. Значительная часть слитков титановых сплавов подвергается в основном обработке металлов давлением и сварке (листовой прокат для химической промышлен-

ности, производство труб и прутков и т.д.). Основными генераторами стружки являются производители сложных деталей авиадвигателей (диски, лопатки, корпуса), силового авиационного комплекса (шпангоуты, элементы оперения) и штамповок других деталей ответственного назначения [5, 9].

Целью исследований являлась системная оценка объемов образования стружки титановых сплавов, потенциально пригодной для современных методов переработки (таких как горячее изостатическое прессование (ГИП), порошковая металлургия, аддитивные технологии), в мировом масштабе и в масштабе Российской Федерации.

Методология проведения исследований и расчетов. Известно, что объемы образования стружки напрямую зависят от объемов переработки заготовок и полуфабрикатов из титановых сплавов в готовые изделия. Оценка проводилась по схеме: Валовое потребление титана в обрабатывающей промышленности $\rightarrow$ Коэффициент перехода в стружку (K_{cm}) $\rightarrow$ Коэффициент пригодности стружки к дальнейшей переработке (K_{np}).

Для реализации указанной схемы расчета предлагается следующая методология:

1. Определение объема заготовок титановых сплавов, направляемых на механическую обработку (МО). Для этого выделяется доля от общего потребления, приходящаяся на производство деталей, изготавливаемых механической обработкой (токарная обработка, фрезерная обработка, строгание, сверление), сопровождаемой съемом стружки (например, 60-70% от аэрокосмического сегмента).

2. Расчет валового объема стружки. Для этого используется средневзвешенный коэффициент стружкообразования (K_{cm}), обратный КИМ. Если КИМ = 0,2 (20%), то тогда имеем $K_{cm} = 0,8$ (80%). Причем, значение K_{cm} варьируется в следующих диапазонах:

- Производство дисков и лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из поковок: КИМ = 0,08-0,15 $\rightarrow K_{cm} = 0,85$ -0,92.

- Обработка фюзеляжных деталей из профилей или плит: КИМ = 0,2-0,4 $\rightarrow K_{cm} = 0,6$ -0,8.

- Производство медицинских имплантатов из прутков: КИМ = 0,3-0,5 $\rightarrow K_{cm} = 0,5$ -0,7.

3. Определение объема пригодной стружки основывается на положении, что не вся стружка может быть эффективно переработана в изделия, к которым предъявляются повышенные требования по качеству исходного материала. Для учета этого момента вводится коэффициент пригодности (K_{np}), учитывающий такие факторы как:

- наличие загрязнения стружечной массы, которое подразумевает наличие в стружке остатков смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), абразивов, других металлов [5];

- возможное смешение стружки различных марок титановых сплавов. В практике переработки отходов известно, что крайне нежелательно и даже не-

допустимое смешение стружечных отходов сплавов марок ВТ6, ВТ3-1, ВТ22, а также технически чистого титана;

- окисление и фрагментация. Известно, что сильно окисленная или слишком мелкая (пылевидная) стружка усложняет ее последующую переработку [9];

- организационно-логистические потери, а также отсутствие системы раздельного сбора отходов в виде стружки на предприятиях.

Для современных аэрокосмических производств с налаженной логистикой K_{np} может достигать 0,6-0,7. Для разрозненных производств – опускаться до 0,2-0,3 [10, 11].

Таким образом, предлагаемая итоговая расчетная формула для определения прогнозируемых объемов пригодной для последующей переработки стружечной массы имеет вид:

$$V_{приг. стр.} = V_{мех. обраб.} \times K_{см} \times K_{np}, \quad (1)$$

где $V_{приг. стр.}$ – объем (вес) стружки пригодной для последующей переработки, т.

$V_{мех. обраб.}$ – объем (вес) слитков и полуфабрикатов, прогнозируемо поступающих на механическую обработку, т.

Результаты исследований (расчетов) и их анализ.

Таким образом, на основе представленной выше методики расчета и прогнозирования можно определить мировые объемы образования пригодной для последующей обработки стружки титановых сплавов. Исходя из мирового потребления заготовок и полуфабрикатов из титановых сплавов (~200 000 т/год) и его распределения по отраслям, на механическую обработку в аэрокосмической и других технологически сложных отраслях промышленности направляется ориентировочно 80 000 – 100 000 т титановых полуфабрикатов в год. При этом, валовое образование титановой стружки при средневзвешенном $K_{см} = 0,75$ составит 60 000 – 75 000 т/год.

Тогда, объем пригодной для последующей переработки стружки в условиях применения $K_{np} = 0,7$ для передовых предприятий и $K_{np} = 0,4$ для остальных (средний по промышленности $K_{np} = 0,55$) варьируется в диапазоне ориентировочно 33 000 – 48 000 т/год.

Однако, учитывая устойчивую тенденцию к увеличению производства изделий авиастроения и ужесточению требований к разделению отходов, верхняя оценка может быть скорректирована в сторону увеличения. Таким образом, реалистичный диапазон мирового объема пригодной для последующей переработки титановой стружки составляет 50 000 – 75 000 т в год. Далее необходимо провести оценку распределения годной для последующей переработки стружки по основным маркам титановых сплавов (ориентировочно):

- Сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V) и его западные аналоги: 70-80% от общего объема (~35-60 тыс. т/год).
- Сплавы ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 (жаропрочные сплавы): 10-15%.
- Сплавы ВТ22, ВТ16 и другие высокопрочные/штампуемые сплавы: 5-10%.

- Технически чистый титан и прочие сплавы: 5-10%.

Далее целесообразно будет провести анализ объемов образования титановой стружки в Российской Федерации, осуществив отраслевой анализ по направлениям производства. Можно отметить, что Россия – один из мировых лидеров в производстве титанового сырья (титановая губка) и полуфабрикатов титановых сплавов. Годовое потребление титана в Российской Федерации оценивается в 25 000 – 30 000 т. При этом выделяются ключевые отрасли-потребители титановых полуфабрикатов:

1. Авиастроение и двигателестроение (ПАО "ОАК", ПАО "ОДК"). При этом объемы составляют до 60-70% внутреннего потребления. Производство деталей для самолетов, вертолетов и двигателей представляют собой основной источник высококачественной, но сильно загрязненной смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ) стружки.

2. Ракетно-космическая промышленность (Корпорация "Роскосмос"). Стружка образуется при производстве из штамповок деталей ответственного назначения. При этом объем металла, идущего на припуски, технологические напуски, штамповочные уклоны при штамповке, на закрытие технологических отверстий, а, следовательно, затем уходящий в стружку может достигать 70-80% от веса заготовки [12]

3. Судостроение, в том числе военное. Стружка образуется при изготовлении корпусных конструкций и насосов для ВМФ.

4. Химическое и энергетическое машиностроение.

По представленной выше методике можно провести оценку объемов получаемой титановой стружки на предприятиях Российской Федерации. Имеем:

- Объем титана, направляемого на глубокую механическую обработку: ~15 000 – 18 000 т/год.

- Валовое образование стружки (при $K_{ст} = 0,8$ для авиа- и двигателестроения и 0,6 для других отраслей промышленности дает в среднем 0,75): следовательно, ежегодные объемы образующейся стружки составляют приблизительно ~11 000 – 13 500 т/год.

- Критический фактор – низкий $K_{пр}$ Система централизованного раздельного сбора и очистки стружки развита слабо. Преобладает смешение стружки титановых сплавов различных марок и их загрязнение остатками СОЖ. Средний $K_{пр}$ для России можно оценить в 0,4-0,5.

- Объем пригодной стружки в Российской Федерации тогда составляет: $11\ 000 \times 0,45 \approx 5\ 000$ т/год (нижняя оценка) до $13\ 500 \times 0,5 \approx 6\ 750$ т/год (верхняя оценка). Таким образом, реальный собираемый и пригодный для переработки объем титановой стружки оценивается в 5 000 – 7 000 т в год.

Необходимо также качественно оценить факторы, определяющие пригодность стружки для высокотехнологичной переработки. Пригодность стружки для методов, гарантирующих высокие механические свойства изделий, определяется жесткими критериями:

1. Химическая чистота. Необходимо строгое разделение фрагментов стружки по маркам сплавов. Примесь даже 2-3% другого сплава может сделать материал непригодным для ответственных деталей [13].

2. Отсутствие примесей. В объеме стружечной массы недопустимы железо и оксиды железа (износ инструмента), вольфрам (крошка от резцов), алюминий (крошка от абразивных кругов), остатки СОЖ, хлор (как остатки от некоторых очистителей).

3. Морфология и размеры частиц. Крупная, завитая, закрученная и длинная стружка предпочтительнее мелкой и дробленой для обеспечения хорошего сцепления при консолидации в условиях брикетирования или горячей деформационной обработки [14].

4. Уровень окисления. Поверхностный слой оксидов должен быть минимальным, чтобы не препятствовать диффузионному сращиванию.

5. Система логистики. Необходима организация "замкнутого цикла" на предприятии: сбор стружки у станков с ЧПУ, централизованное удаление СОЖ (центрифугирование, отжиг), сепарация по маркам сплавов, местное брикетирование для транспортировки [11, 14].

Необходимо отметить, что в России основным барьером является именно отсутствие отлаженной логистической цепочки и экономических стимулов для производителей отходов инвестировать в их сегрегацию [15].

Была проведена экономическая оценка рынка ежегодно возобновляемого ресурса в виде стружки титановых сплавов. Известно, что точный учет объемов пригодной для дальнейшей переработки титановой стружки – это основа для бизнес-моделей перерабатывающих предприятий. При стоимости стружки, как условного сырья, в 100-150 руб./кг на российском рынке и 10 \$/кг на мировом, российский рынок пригодной к переработке стружки оценивается в 0,7 – 1,05 млрд. руб. ежегодно; мировой рынок – в 500 – 750 млн. \$.

В итоге, в результате проведенного анализа были получены следующие важные показатели и выявлены основные положения:

1. Проведенный анализ позволяет констатировать наличие значительного и стабильно возобновляемого ресурса в виде стружки титановых сплавов. Мировой промышленно доступный объем титановой стружки, пригодной для переработки оценивается в 50 – 75 тыс. т в год; по Российской Федерации – 5 – 7 тыс. т в год.

2. Основная масса стружки (70-80%) представлена сплавами системы Ti-6Al-4V (BT6, Grade 5), что упрощает организацию ее переработки.

3. Ключевым ограничивающим фактором, особенно в России, является не объем, а качество организации сбора и подготовки стружки. Коэффициент пригодности (K_{np}) может быть повышен с текущих 0,4-0,5 до 0,7-0,8 за счет внедрения систем менеджмента отходов на машиностроительных предприятиях.

4. Наибольший потенциал сосредоточен в сегменте авиационного двигателестроения, где высокие потери металла сочетаются с потенциально высокой организованностью производства [12].

5. Развитие технологий переработки стружки титановых сплавов в готовые изделия без переплава [3, 5, 7, 10] создает устойчивый рыночный спрос на данное вторичное сырье, трансформируя его из "отходов" в "ресурс". Для реализации этого потенциала необходима разработка национальных и отраслевых стандартов на вторичную титановую стружку, а также создание экономических механизмов, стимулирующих ее отдельный сбор и подготовку к последующей переработке.

6. Учет и рациональное использование титановой стружки является не только фактором экономической эффективности, но и важнейшим элементом перехода к циркулярной (замкнутой) экономике в высокотехнологичном металлургическом и машиностроительном секторах.

Заключение. Таким образом, был проведен комплексный анализ и оценка объемов образования отходов титановых сплавов в виде стружки на глобальном и национальном (в пределах Российской Федерации) уровнях. Исследование базировалось на анализе структуры мирового потребления титана, коэффициентов использования материала (КИМ) в ключевых отраслях-потребителях и специфики механической обработки различных титановых сплавов. Были определены методологические подходы к оценке объемов стружки, пригодной для высокотехнологичной переработки (порошковая металлургия, газостатическое изотермическое прессование (ГИП)). Была проведена детализация особенностей образования отходов и их объемов по основным промышленным сегментам: авиационно-космическому, энергетическому, судостроительному, медицинскому и др. Для Российской Федерации был проведен отдельный анализ на основе данных о производстве полуфабрикатов и их переработке в готовые (конечные) изделия. Результаты проведенного анализа показывают, что мировой объем ежегодно образующейся титановой стружки, пригодной для последующей переработки, оценивается в диапазоне 50-75 тысяч тонн, а в России – 5-7 тысяч тонн. Установлены ключевые факторы, ограничивающие пригодность стружки для вторичного использования: смешение стружечных отходов сплавов различных марок, загрязнение стружки остатками смазочно-охлаждающих жидкостей, проблемы в организации логистики по доставке отходов к перерабатывающим предприятиям и т.д. По итогам проведенного анализа можно сделать однозначный вывод о значительном сырьевом потенциале ежегодно возобновляемых отходов в виде титановой стружки для создания ресурсосберегающих производственных циклов.

Список литературы:

1. Братухин А.Г. Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники. В 2-х т. Т. 1. М.: Машиностроение. – 1996. – 524 с.

2. Воробьев И. А., Галиахметов Т. Ш. Крепежные изделия из титановых сплавов для авиакосмической техники // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102. – № 5. – с. 379-384. doi: 10.36652/0042-4633-2023-102-5-379-384.
3. 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.
4. Костыгова Л.А. Кругооборот титана в промышленности Российской Федерации // Экономика в промышленности. – 2013. – № 1. – с.53-57.
5. 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.
6. Анализ рынка титана в России-2026. Показатели и прогнозы. Аналитический отчет корпорации Tebiz Group. М.: Tebiz Group – 2025. – 197 с.
7. Петрова Л.Г., Лысак В.В., Малькова Е.В. Оценка состояния титанового рынка в условиях современной геополитической обстановки. // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. – 2022. – № 4(5). – с. 18-30.
8. Спрос vs геополитика: рынок титана в 2023 году. Аналитический отчет Института изучения мировых рынков. М.: Росконгресс. – 11 с.
9. 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.
10. Жаров М.В. Влияние водородного пластифицирования стружки титановых сплавов на особенности ее пластической деформации // Metallurg. – 2025. – № 6. – с. 47-53. doi: 10.52351/00260827_2025_6_47.
11. ГОСТ 1639-2009. Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Общие технические условия. М.: ФГУП СтандартИнформ. – 2011. – 66 с.
12. 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.
13. Topolski K., Jaroszewicz J., Garbacz H. Structural aspects and characterization of structure in the processing of titanium grade different chips // Metals. – 2021. – No 11(1). – p. 101-124. doi: 10.3390/met11010101.
14. 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.
15. Ровин Л.Е., Валицкая О.М. Ресурсосбережение при брикетировании стружки // Вестник Гомельского государственного технического университета. – 2016. – № 2. – с. 27-35.