

УДК 669.187.526.001.57

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ЛЕГКОВЕСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Д. В. Ботвинко, В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев,  
Д. М. Жиров, В. Г. Кожемякин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.  
03068, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены источники образования металлических отходов и актуальность их переработки. Проанализированы легирующие элементы, присутствующие в металлических отходах, которые могут быть утрачены в процессе переработки. Рассмотрены способы переплава металлических легковесных отходов без предварительной подготовки (плазменно-дуговой, индукционный, электрошлаковый), показаны их эффективность и недостатки. Определено, что для удобства загрузки стружки в печь ее необходимо предварительно скомпактировать с целью уменьшения объема (в 8 раз). Рассмотрены способы подготовки отходов, которыми являются холодное и электроимпульсное, электротермическое виды компактирования, их эффективность и недостатки. Приведены результаты переплава скомпактированных заготовок способами ЕШП и ПДП. Библиогр. 24, табл. 1, ил. 9.

**Ключевые слова:** стружка; легирующие элементы; компактирование; электрод; заготовка; электрошлаковый переплав; плазменно-дуговой переплав; индукционный переплав; качество слитков

В настоящее время в странах СНГ выпускается более 5000 марок сталей. Особое значение при этом имеет выбор легирующих элементов (хром, никель, марганец, вольфрам, молибден, ниобий, титан, ванадий и др.), повышающих прочность, коррозионную стойкость стали, снижающих опасность хрупкого разрушения и экономическую эффективность использования сталей. Указанные элементы вводят

в жидкую сталь как в чистом виде, так и в виде ферросплавов. Стоимость сталей определяется наличием легирующих элементов, т.е. природных запасов металлов, масштабами их производства и конъюнктурой мирового рынка.

В странах СНГ увеличивается спрос на легированные стали в среднем на 5 %, повышаются цены на легирующие элементы [1].

Легированные стали в основном используются для ответственных конструкций различного назначения, например изготовления деталей машин, подвергающихся большим нагрузкам, а также оборудования и сложных конструкций.

При механической обработке деталей образуется большое количество стружки, коэффициент использования металла при этом составляет 20...40 % [2].

Рациональное использование отходов, образующихся на инструментальных и машиностроительных заводах, — важнейшая задача. Особенно это касается дорогих жаропрочных сплавов и нержавеющей сталей. Существующие технологии переработки кусковых и стружечных отходов инструментальных сталей являются многоступенчатыми и связаны с большими энергозатратами. Для реализации электрошлакового переплава инструментальной стружки используют конструкцию установки ЭШП [3], принципиальная схема которой представлена на (рис. 1).

Из бункера стружка по наклонному желобу через промежуточную воронку подается на весовой дозатор, а затем через вибрационную воронку доза-

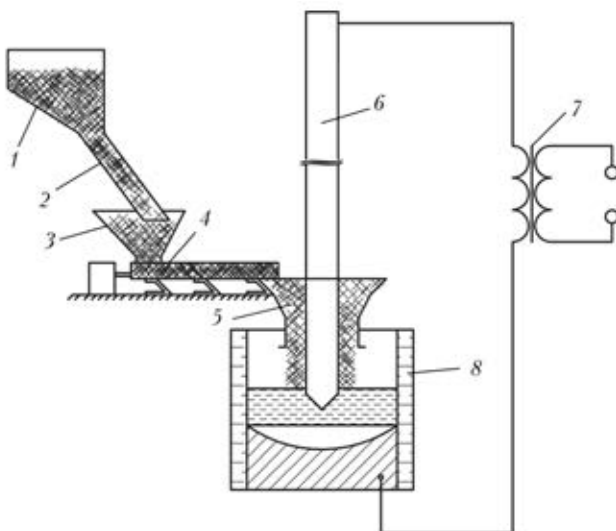


Рис. 1. Схема электрошлаковой печи типа А-550: 1 — бункер; 2 — желоб; 3 — промежуточная воронка; 4 — весовой дозатор; 5 — вибрационная колонна дозатора; 6 — электрод; 7 — источник питания (трансформатор); 8 — кристаллизатор



## Химический состав стали Р6М5

Материал	Массовая доля элементов, %				
	C	W	Mo	Cr	V
Стружка	0,91	6,1	5,2	4,1	2,0
Слиток ЭШП	0,92...0,95	5,75...5,85	4,80...4,95	4,0	1,85...1,90

*Примечание.* Угар для стружки и слитка ЭШП составляет 20 мас. %.

тора поступает в кристаллизатор, где происходит ее плавление электродом. Для подачи стружки в кристаллизатор можно использовать, например, вековой дозатор ДН-21У с ленточным питателем. Производительность дозирования стружки варьировалась в пределах 30...160 кг/ч.

Установка для ЭШП стружки может быть смонтирована на базе серийного аппарата для электрошлаковой сварки и наплавки А-550 с источниками питания — однофазными трансформаторами ТСД-2000.

Предложенная технология реализована на стандартной электрошлаковой печи типа А-550, оборудованной системой дозирования и подачи стружки. Плавку стали Р6М5 выполняли в кристаллизаторе ЭШП диаметром 125 мм с применением литого электрода диаметром 50 мм, выплавленного в дуговой электропечи с использованием 100 % кусковых отходов инструментального производства и введения с дозатора в процессе переплава стружки стали Р6М5.

При этом для получения качественного слитка количество используемой для переплава стружки не должно превышать 60...70 % массы шихты [4]. Химический состав стружки и отливки стали Р6М5 приведен в таблице.

Быстрорежущая сталь Р6М5, полученная из стружки ЭШП, характеризуется отсутствием дефектов ликвационного происхождения, плотной бездефектной макроструктурой, микроструктурной структурой и структурной однородностью.

Таким образом, предложенный способ электрошлакового переплава стружки позволяет получать инструментальную сталь, которая полностью соответствует всем требованиям стандарта.

Преимуществом установок ЭШП является универсальность (можно плавить чугун и любые марки стали), сравнительно невысокая стоимость оборудования, компактность, простота управления. Существенный недостаток заключается в высоких значениях энергоемкости, большом угаре металла и легирующих элементов.

В промышленности для переплавки отходов тугоплавких металлов и сплавов используют электронно-лучевые [5], дуговые [6] и плазменно-дуговые [7] печи мощностью до 600 кВт [8].

Наиболее производительной является электронно-лучевая технология переплава с переливом, когда плавка и рафинирование отделены от процесса кристаллизации сплава, а печь имеет 4–5 электронных пушек различной мощности. При переплаве титана жидкая ванна перегревается на 150...200 °С выше температуры ликвидуса, сливной носок изложницы обогревается, форма может быть непод-

вижной или вращаться вокруг своей оси с частотой до 500 об/мин. Плавка происходит при остаточном давлении  $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па. Процесс плавки начинают с наплавки гарнисажа, затем вводят лом.

При плавке в дуговых печах используют нерасходуемый и расходуемый электроды. При использовании нерасходуемого электрода шихту загружают в тигель, чаще всего в медный водоохлаждаемый или графитовый кристаллизатор, в качестве электрода используют графит или вольфрам. При заданной мощности плавка различных металлов отличается скоростью плавления и рабочим вакуумом. Плавку проводят в два этапа: нагрев шихты и собственно плавление. Масса разливаемого металла на 15...20 % меньше из-за образования гарнисажа [9]. На этом переделе общий угар шихты составляет 6...12 %.

Для переплава стружки в индукционных печах требуется преодоление ряда технологических трудностей, поскольку стружка плохо разогревается. При этом существенно снижается КПД печей и их производительность. Насыпная масса стружки составляет около  $1...2 \text{ т/м}^3$ , поэтому она всплывает и накапливается в холодном шлаке [10]. Оксиды, вносимые стружкой, приводят к обезуглероживанию сплава, накоплению неметаллических включений, газовых пор и т. д. Как правило, доля стружки в шихте при индукционной плавке не превышает 10...15 %. Окалина вообще не поддается переработке в традиционных печах.

Плазменно-дуговой способ переплава шихты в подвижном кристаллизаторе позволяет избежать загрязнения металла углеродом, входящим в состав футеровки, азотом и кислородом, шлаковыми включениями, присущими промышленным способам выплавки ферросплавов [11]. Это дает возможность существенно повысить качество ферросплавов и легированных сталей [12]. В результате переплава получены слитки из шихтовых отходов (фракции 2...5 и 5...12 мм). Перед плавкой камеру вакуумировали и заполняли аргоном до избыточного давления, в процессе плавки поддерживали его в пределах 10...30 кПа. Расход аргона в плазматроне составлял около 5 л/мин.

Основной недостаток плазменно-дугового способа переплава шихты заключается в ограничении геометрических размеров при переплаве, а также невозможности подгрузить шихту, расходе аргона, сложности оборудования.

Производительность плазменно-индукционных печей на 25...30 % выше, чем индукционных. Существует ряд схем плазменно-индукционных печей (рис. 2) [13], наиболее применяемых при переплаве сыпучей легковесной шихты типа латунных шлаков

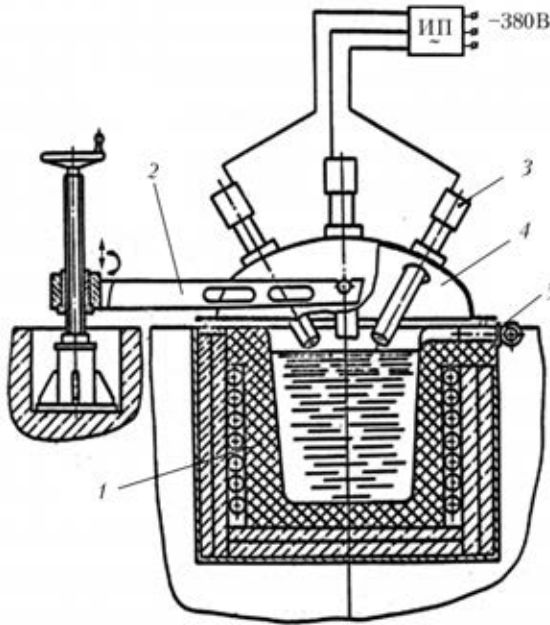


Рис. 2. Схема плазменно-индукционной печи: 1 — тигель; 2 — поворотная балка поднимающего механизма; 3 — плазмотроны; 4 — футерованная водоохлаждаемая крышка; 5 — уплотняющий клапан

и стружки, где требуется невысокий удельный тепловой поток энергии в жидкий металл для предотвращения потерь на угар цинка и других элементов с высокой упругостью пара.

При переплаве латунной стружки с большим содержанием цинка, например ЛЦ40С, угар металла превышает 12%. Введение стружки в шихту в значи-

тельных количествах приводит к ее чрезмерному окислению во время плавки и образованию большого количества шлака, что приводит к зарастанию горловины тигля и каналов. Также безвозвратно теряются легирующие элементы (цинк, олово, марганец и др.) [13, 14]. Поэтому общее количество стружки ограничено 15% массы шихты.

Анализ способов показал, что для удобства загрузки стружки ее лучше скомпактировать в заготовку при дальнейшем использовании для переплавных процессов.

Основными способами получения скомпактированных заготовок для переплавных процессов в настоящее время является холодное полунепрерывное и электроимпульсное прессование через конусную проходную или глухондную матрицу [15]. При холодном прессовании сцепление кусочков шихты осуществляется за счет механического сдавливания контактов, возникающих при больших усилиях деформации, зависящих от пластичности прессованных материалов [16].

Так, для получения скомпактированной заготовки требуемых прочности и габаритов (диаметр 350...650 мм, длина 5000 мм) необходимо создавать большие значения удельного давления прессования (6,5...9,0 кПа). Для этого применяют вертикальный пресс (рис. 3), который представляет собой гигантские конструкции стоимостью до 10 млн дол. США [17].

Первая порция шихты после прессования полностью не вытягивается. Часть оставшейся в матрице служит подвижным поддоном для следующей порции. При максимальных значениях усилия прессовки осуществляется перемещение прессовки вдоль внутренней поверхности матрицы. Процесс протекает непрерывно до достижения необходимых размеров отпрессованных заготовок.

Из-за образования больших растягивающих напряжений возникают трещины, которые могут стать причиной разрушения расходуемого электрода в процессе плавки. Высокопрочные легированные стали фактически не поддаются компактированию с использованием этого способа, поскольку для их прессования необходимо применение еще более высокого давления в связи с малой пластичностью, что способствует повышению себестоимости продукции и снижению производительности.

Существует способ электроимпульсного брикетирования металлической стружки и других шихтовых материалов (рис. 4) [18]. Суть способа заключается в том, что стружку прессуют при сравнительно небольшом давлении (до 500 Па), а затем подвергают специальной обработке с использованием коротких импульсов электрического тока.

Механизм нагрева предварительно спрессованной стружки в брикет заключается в следующем. Через стружку подают короткие импульсы электрического тока, стружка нагревается в зоне контакта ее частиц.

В связи с тем, что сопротивление контактов между частицами стружки значительно выше, чем

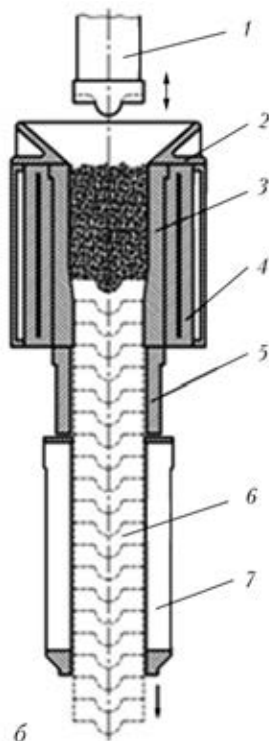
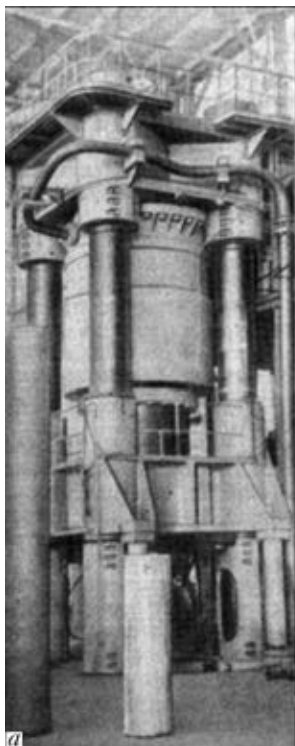


Рис. 3. Гидравлический пресс для изготовления расходных электродов: а — общий вид, на переднем плане готовые электроды; б — схема гидравлического пресса; 1 — пресс-штемпель с фигурной шайбой; 2 — приемная воронка; 3 — втулка контейнера; 4 — контейнер; 5 — первая направляющая втулка; 6 — электрод; 7 — вторая направляющая втулка

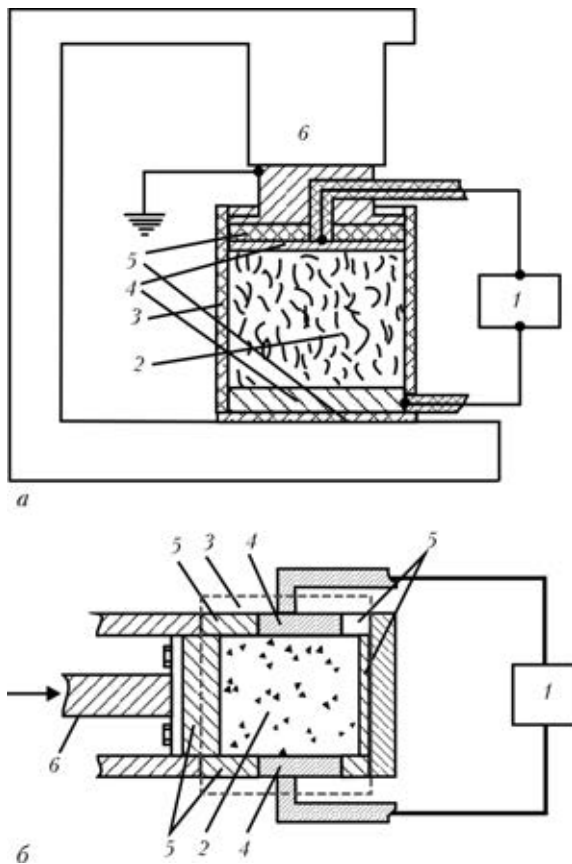


Рис. 4. Схемы установок для использования способа электроимпульсного брикетирования с вертикальным (а) и горизонтальным (б) прессами: 1 — источник импульсного электрического тока; 2 — стружка; 3 — электроизолированная пресс-форма; 4 — электроды; 5 — изоляторы; 6 — пресс

частиц, джоулева энергия при протекании тока выделяется практически только в местах контактов между частицами, при этом длительность импульса тока задается таким образом, чтобы за время импульса энергия не успела выделиться из зоны контактов за счет теплопроводности. Это дает возможность локального разогрева зоны контактов между частицами шихты без разогрева всей массы.

Однако полученные таким образом брикеты в ряде случаев имеют недостаточные значения плотности и прочности (для высокопрочных сплавов пористость брикетов составляет до 50 %), поскольку при указанных режимах невозможно образование прочных и надежных контактов между частицами стружки в процессе их спекания.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ компактирования стружки способом полунепрерывного горячего прессования под током и создана опытная промышленная установка. Суть способа заключается в компактировании стружки одновременно с прямым электронагревом в проходной матрице специальной конструкции (рис. 5) [19].

Процесс осуществляется при относительно невысоких усилиях (2,5 МПа), что значительно сокращает стоимость оборудования. Установка оснащена механизмом вытягивания, что позволяет получать компактированную заготовку (рис. 6) до 1 м с

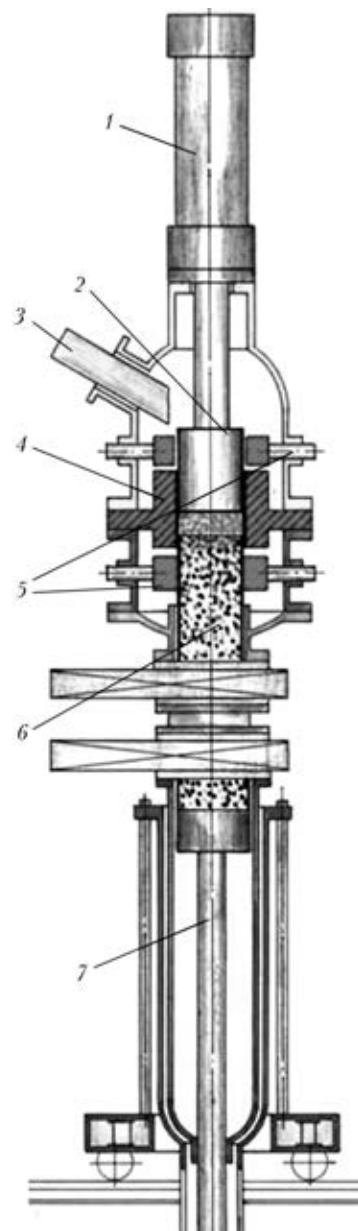


Рис. 5. Схема установки для компактирования: 1 — гидроцилиндр; 2 — пуансон; 3 — лоток для подачи стружки; 4 — матрица; 5 — токоподводы; 6 — скомпактированная заготовка; 7 — шток

плотностью, составляющей 60...65 % теоретической, которую можно использовать в дальнейших переплавных процессах.

ЭШП спрессованной заготовки из стружки ЭП609-Ш производили в глухонном кристаллизаторе с жидким стартом. В качестве шлака применяли смесь АНФ-6 с флюоритовым концентратом при значениях тока 1,5...2,0 кА и напряжения 35...36 В. В результате выплавлены слитки диаметром 175 мм, высотой 175...250 мм и массой 32...42 кг

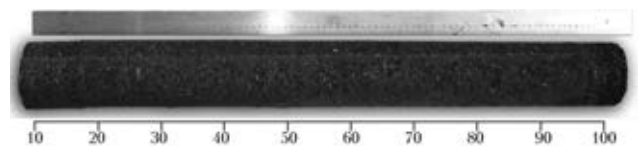


Рис. 6. Заготовка, скомпактированная из стружки жаропрочного сплава ЭП609-Ш

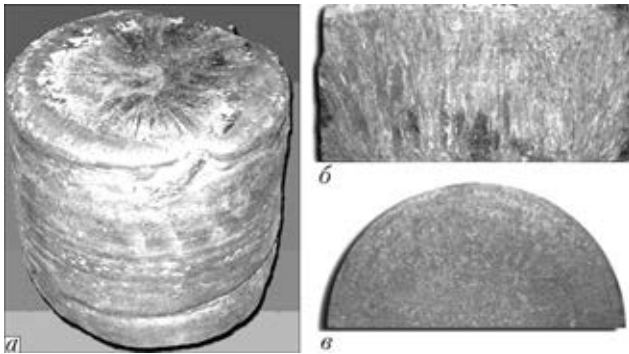


Рис. 7. Слиток диаметром 175 мм (а), выплавленный способом ЭШП из скомпактированной стружки ЭП609-Ш; б — поперечное; в — продольное сечение

(рис. 7). Металлографические исследования темплетов (рис. 7, б, в) показали, что металл имеет плотную структуру без видимых дефектов [20].

Механические свойства и химический состав выплавленного металла соответствуют требованиям И 225.105.092–87 для состава слитков ЭП-609-Ш.

Для плазменно-дугового переплава (ПДП) скомпактированной заготовки из смеси аустенитных сталей X18N9 и X18N10T использовали кристаллизаторы двух типов (диаметром 125 мм и квадратный со стороной 125 мм). В результате ПДП получено два типа слитков круглого (рис. 8, а) и квадратного сечений (рис. 8, б) [21]. Исследования химического состава показали, что в процессе ПДП все

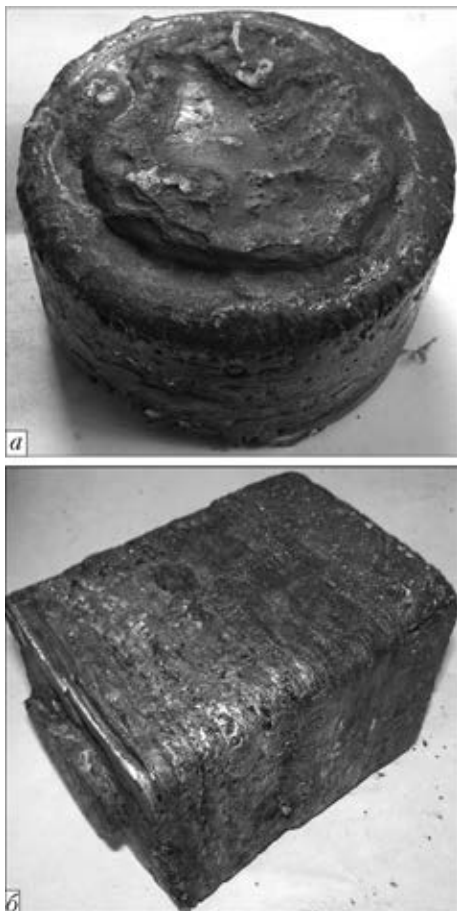


Рис. 8. Слитки круглого (а) и квадратного (б) сечений, полученные в результате ПДП заготовки, скомпактированной из стружки сталей X18N10T и X18N9

легирующие элементы находятся в пределах, допустимых ГОСТ 977–98, в том числе титан и углерод. Механические свойства выплавленного металла соответствуют требованиям ГОСТ 977–98, а по некоторым показателям превосходят их.

Из поперечных темплетов изготовили макрошлифы круглые диаметром 125 мм и квадратные со стороной 125 мм (рис. 9, а, б). На поперечных темплетах видно, что металл плотный, каких-либо дефектов не обнаружено, однако на продольных образцах слитков (рис. 9, в) выявлены одиночные крупные включения шлака диаметром 5...7 мм.

После переплава на поверхности слитка образуется шлаковая корка. На боковых поверхностях ее толщина достигает 1 мм, а на верхнем торце слитка 10 мм, что мешает формированию ровной поверхности слитка. Это можно объяснить тем, что в скомпактированной заготовке присутствуют несгоревшие остатки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Следовательно, для получения более качественных слитков, выплавливаемых в условиях ПДП, стружку аустенитных нержавеющей сталей перед компактированием необходимо промывать от СОЖ и снижать скорость вытягивания слитка при переплаве до 2...4 мм/мин [22–24].

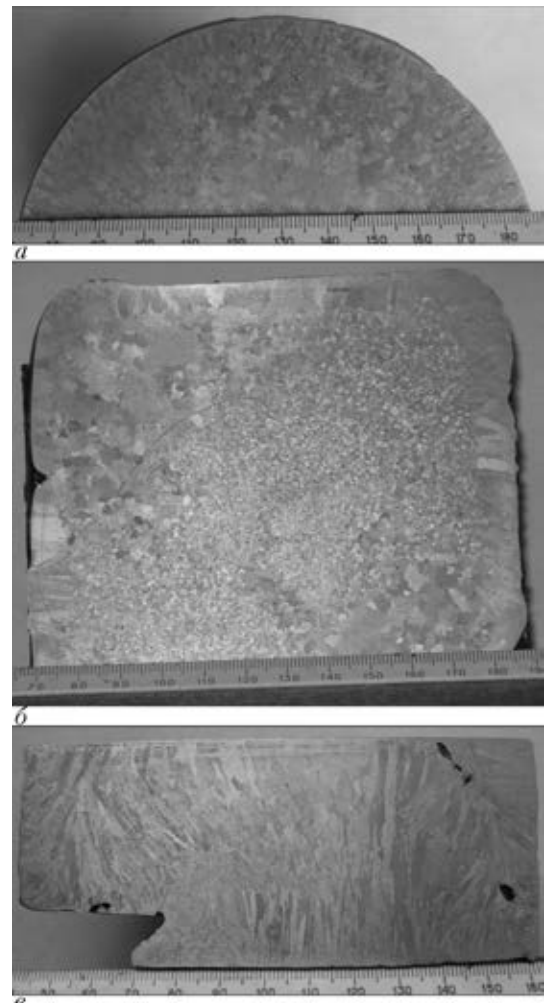


Рис. 9. Макрошлифы поперечных круглого (а), квадратного (б) и продольного (в) темплетов



## Выводы

1. Основные недостатки способов прямого переплава измельченных легковесных металлических отходов заключаются в ограниченном объеме загрузки стружки в плавильное пространство из-за ее низкой насыпной массы, существенного угара легирующих элементов. Показано, что при компактировании стружки в заготовку объем уменьшается в 4...8 раз, благодаря чему ее удобно транспортировать, а также использовать в дальнейшем переплаве в виде брикетов или расходоуемых электродов.

2. Анализ литературы показал, что заготовки, полученные способами холодного и электроимпульсного компактирования, имеют низкие значения механических свойств, что является причиной разрушения электрода при переплаве. С целью устранения недостатков предложен способ электротермического компактирования для получения компактных и длинномерных заготовок, которые можно использовать в качестве электродов или заготовок для процессов спецэлектрометаллургии.

3. Показано, что процесс ЭШП скомпактированных заготовок проходит стабильно, часть остатков СОЖ удаляют после компактирования, а остальные — при прохождении капель металла через шлак. Результаты исследования полученных слитков ЭШП стали ЭП609-III показали, что химический состав и механические свойства стали сохраняются.

4. Химический состав слитков, полученных при ПДП скомпактированных заготовок из стружки X18N10T и X18N9, соответствует ГОСТ 5632-72. Для повышения качества слитков при ПДП необходимо промывать стружку перед компактированием, защищать зону компактирования аргоном и уменьшать скорость переплава заготовок.

1. Моргунов В. М. Печи литейных цехов (учебное пособие). — Пенза, 2009. — С. 135-140.
2. *Металургія* кольорових металів Ч. 7. Вторинна металургія кольорових металів / В. М. Бредихін, М. О. Маняк, В. О. Смирнов та ін. — Запоріжжя, 2009. — С. 21-23.
3. Пат. 2405843 РФ, МПК С 22 В 9/18, В 22 В 23/10. Способ выплавки высококачественных инструментальных сталей из отходов инструментального производства / В. А. Альтман, О. И. Орлов. — Опубл. 02.10.2010, Бюл. № 10.
4. Строганов А. И., Петров А. К., Зверев Б. Ф. Потери вольфрама при производстве быстрорежущей стали // *Металлург.* — 1971. — № 1. — С. 30-33.

5. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Е. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 237 с.
6. *Металлургия* титана / В. В. Гармата, В. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1968. — 624 с.
7. Патон Б. Е., Лакомский В. И., Забарилко О. С. Плазменно-дуговые печи с медным водоохлаждаемым кристаллизатором // *Сталь.* — 1967. — № 6. — С. 507-511.
8. Иванов В. Г. Переплав стружки быстрорежущих сталей // *Металлургия.* — 1975. — № 4. — С. 25-26.
9. Мілевська О. М., Ремізов Г. О. Особливості плазмової гарнісажної плавки, УП-109 // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра.* — Київ: КПІ, 2011. — 64 с.
10. Костяков В. Н. Плазменно-индукционная плавка. — Киев: Наук. думка, 1991. — 208 с.
11. Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. — М.: Металлургиздат, 1963. — 540 с.
12. Меськин В. С. Основы легирования стали. — М.: Металлургиздат, 1964. — 684 с.
13. Виноградов М. И. Включения в стали и ее свойства. — М.: Металлургиздат, 1963. — 252 с.
14. Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техника, 1974. — 336 с.
15. Ерохин А. А. Закономерности плазменно-дугового легирования и рафинирования металлов. — М.: Наука, 1984. — 185 с.
16. Кришкін Б. Б. Впровадження технологій холодного об'ємного штампування на підприємствах із дрібносерійним характером виробництва // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* — 2008. — Вип. 20. — 57 с.
17. Нікітін В. В. Створення та дослідження технології брикетування порошкових відходів алюмінієвого виробництва: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Донецьк, 2002. — 20 с.
18. Нікітін В. В. Створення та дослідження технології брикетування порошкових відходів алюмінієвого виробництва: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Донецьк, 2002. — 20 с.
19. Самуйлов С. Д. Электрофизический способ брикетирования металлической стружки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб, 2002. — С. 22.
20. Пат. 7997 Украина, МПК С 22В1/24. Спосіб компактування металевої шихти / Б. Є. Патон, М. Л. Жадкевич, В. О. Шаповалов та ін. — Опубл. 10.08.2007; Бюл. № 12.
21. *Качество* слитков ЭШП, выпаленных из электродов, спрессованных из стружки аустенитных нержавеющей сталей / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Ф. К. Биктагиров и др. // *Современ. металлургия.* — 2012. — № 4. — С. 46-48.
22. *Плазменно-дуговой* переплав заготовки, скомпактированной из стружки стали ЭП609-III / В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. Р. Бурнашев, Ю. А. Никитенко // Там же. — 2011. — № 3. — С. 21-23.
23. *Поведение* газовых примесей при плазменно-дуговом переплаве заготовки, скомпактированной из стружки аустенитных нержавеющей сталей / В. А. Шаповалов, В. Р. Бурнашев, Д. М. Жиров и др. // Там же. — 2012. — № 2. — С. 45-46.
24. *Плазменно-дуговой* переплав заготовок, скомпактированных из стружки аустенитных нержавеющей сталей / В. Р. Бурнашев, В. А. Шаповалов, Д. М. Жиров и др. // Там же. — 2013. — № 1. — С. 37-40.

Considered are the sources of formation of metallic wastes and urgency of their recycling. Analyzed are the alloying elements, contained in metal wastes, which can be lost during recycling. Methods of remelting of metal light-weight wastes without preliminary preparation: plasma-arc, induction, electroslag are described, their efficiency and drawbacks are shown. It was found, that for convenience of chips loading into the furnace it is necessary to compact them for decreasing the volume (8 times). The methods of waste preparation, which are cold and electro-pulsed, electro-thermal compacting, their efficiency and drawbacks are considered. The results of remelting of compacted billets by ESR and PAR methods are given. 23 Ref., 1 Table, 9 Figures.

**Key words:** chips; alloying elements; compacting; electrode; billet; electroslag remelting; plasma-arc remelting; induction remelting; quality of ingots