

# Переработка отходов штамповки сплава Co-Cr-Mo с использованием электронно-лучевого переплава

*А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, В.Г. Залесский*<sup>1</sup>

Физико-технический институт НАН Беларуси  
220141 Минск, Беларусь

<sup>1</sup> Полоцкий государственный университет  
211440 Новополоцк, Беларусь  
e-mail: e-phys@tut.by, v.zaleski@mail.ru

## Введение

Физико-техническим институтом НАН Беларуси освоено изготовление ряда медицинских имплантатов, в частности совместно с ЗАО «Алтимед» - эндопротезов тазобедренного сустава. Их выпуск в 2009 г. должен составить 4000 комплектов. Износостойкость, биосовместимость, стойкость в условиях коррозионного воздействия делает сплавы на основе титана и кобальта перспективными для изготовления медицинских имплантатов. Типичный представитель сплавов на основе кобальта - «виталиум» (HS-21), обладающий хорошими литейными свойствами и характеризующийся низкой пластичностью. Традиционные технологии изготовления деталей имплантатов, основанные на обработке резанием, для отдельной номенклатуры изделий, например, чашки и ножки эндопротеза тазобедренного сустава, имеют коэффициент использования материала, не превышающий 20-30%. Эффективность использования материала повышается при применении методов обработки давлением, в частности, горячей штамповки, основанной на методах пластического деформирования полуфабрикатов, приближающихся по форме и размерам к готовым деталям [1]. Учитывая специфические условия пластического деформирования сплавов при изготовлении деталей эндопротезов (узкий температурный диапазон деформации, высокое сопротивление деформированию и другие), велика вероятность получения бракованных заготовок, имеющих на поверхности глубокие трещины. При формообразовании деталей эндопротезов образуются отходы в виде облоя, стружки и т.п. Количество неиспользованного материала составляет в среднем около 30%. Высокая стоимость сплава Co-Cr-Mo сплава (около 200 €/кг) вызывает необходимость разработки технологий переработки отходов с целью их вторичного использования.

Переплав с применением высокочастотных индукционных печей в среде аргона [2] и литья с центробежным переплавом [3] применять нежелательно, поскольку в отливке формируется пористость, резко ухудшающая функциональные свойства (например, происходит локальная коррозия), что недопустимо для высоконагруженных деталей эндопротезов. Кроме этого, даже при подборе определенного состава шихты нет гарантии полного исключения кислорода (оксидов), образованных после горячей штамповки, из отливки. Оксиды ухудшают технологические характеристики сплава, что вызывает определенные трудности на последующем этапе штамповки. Для получения металлов и сплавов особой чистоты применяются металлургические процессы электронно-лучевого переплава (ЭЛП) материалов [4]. Такая технология позволяет существенно снизить потери дорогостоящих металлов, повысить их качество благодаря рафинированию, а также разрабатывать новые сплавы с уникальными свойствами. Пониженное давление газовой фазы обеспечивает наиболее эффективную защитную атмосферу вокруг расплавленного металла, ускоряет металлургические реакции, приводит к дегазации, раскислению, восстановлению и испарению летучих примесей. На примере ряда сталей, металлов и сплавов показана возможность существенного рафинирования материалов как при их ЭЛП, так и оплавлении поверхности заготовок, а также изготовления новых и восстановления изношенных деталей.

ЭЛП металлов влияет на их структуру и свойства и полезен для улучшения служебных характеристик металлов и сплавов. На свойства значительно влияет степень чистоты металла, т.е. присутствие неметаллических включений, а также содержание газов. Одним из способов повышения пластичности сплава Co-Cr-Mo является очищение его от различного рода примесей, поскольку даже содержание 0,01% некоторых из них может оказывать значительное влияние на склонность к дефектообразованию при деформации. С увеличением времени выдержки в расплавленном состоянии во время переплава концентрация примесей уменьшается для всех металлов и сплавов.

Процессы переплава и очистки металлов, как правило, сопровождаются интенсивным газоотделением, что приводит к значительному снижению ресурса термокатодных пушек, которые обычно используются для этих целей. В Полоцком государственном университете ведутся исследования в области разработки электронно-лучевых устройств на базе пушек с плазменным катодом различного технологического назначения (сварки, пайки, упрочнения материалов) [5]. Такие пушки обладают значительно большим ресурсом, особенно в условиях технологической неустойчивости рабочего давления и испарения материалов в рабочей камере, поскольку в них отсутствуют накаливаемые части.

В работе изучено влияние электронно-лучевого нагрева и переплава на структуру, твердость и технологические свойства отливок из отходов Co-Cr-Mo сплава с использованием электронных пучков, сформированных в термокатодной пушке и источнике с плазменным катодом.

## **Оборудование**

Обработку электронным лучом вели на установке, созданной на базе энергоблока ЭЛА-15 (ускоряющее напряжение 60 кВ, мощность луча до 15 кВт, луч диаметром 1 мм расфокусировали для получения требуемой плотности мощности), и на устройствах, использующих пушки с плазменным катодом.

Проведен анализ возможных способов получения сильноточных электронных пучков с помощью электронных пушек с плазменным эмиттером. Пучки с мощностью до 10 кВт могут быть получены на основе газоразрядных структур с аномальным тлеющим разрядом. Увеличение мощности электронных пучков возможно при использовании газоразрядных устройств с дуговым разрядом.

Предложены три конструкции плазменных эмиттеров, способных работать как в режиме сильноточного тлеющего разряда, так и в режиме дугового разряда. Первая конструкция основана на газоразрядной структуре с полым катодом. Для зажигания дугового разряда в полном катоде предусмотрена магниевая вставка, обеспечивающая снижение минимального значения тока разряда, при котором реализуется дуговой режим. Вторая структура основана на газоразрядной структуре со скрещенными полями. Для активации дугового разряда магниевая вставка расположена в области магнитного поля с наибольшей индукцией. Третья структура также основана на газоразрядной структуре со скрещенными полями, однако с целью исключения локализации катодного пятна предложен способ переключения разряда. При этом во вспомогательном аноде структуры предусмотрена магниевая вставка, а система управления при зажигании дугового разряда переключает вспомогательный анод в цепь катода. Тем самым формируется поперечный магнитному полю дуговой канал, что должно обеспечить дрейф катодного пятна по поверхности электрода (анода с магниевой вставкой). Для выявления основных этапов формирования дугового разряда в исследуемых газоразрядных структурах разработана и изготовлена система импульсного питания. Проведенные эксперименты выявили перспективность применения газоразрядных структур для получения сильноточных электронных пучков.

Исследования по выявлению влияния давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера показали, что эмиссионной способностью предлагаемых для создания

плазменных пушек газоразрядных структур можно эффективно управлять напуском газа в газоразрядную камеру. Плазменный эмиттер способен устойчиво работать в достаточно широком диапазоне величин интенсивности напуска газа. Этим обеспечивается устойчивость работы электронной пушки в условиях всплеска давления (вплоть до  $3 \cdot 10^{-1}$  Па), возникающего при ЭЛ переплаве материалов. Для снижения влияния всплеска давления целесообразно применять широкие электронные пучки. При этом в отличие от технологий с применением сканирующего сфокусированного электронного пучка можно обеспечить меньшие потери материала, снизить изменение его химического состава и уменьшить величину всплеска давления в камере, обусловленного парами испаряемого материала.

Влияние давления газа на характер распространения электронного пучка и на взаимодействия его с обрабатываемым материалом обусловлено следующими процессами:

- ионизацией газа электронным пучком и формированием вследствие этого интенсивного ионного потока в ускоряющий промежуток и область формирования пучка вплоть до образования у обрабатываемой поверхности вторичной плазмы, инициируемой электронным пучком;

- рассеянием электронов на остаточном газе, парах металлов, образующихся при переплаве, и, вследствие этого, плазменно-пучковым взаимодействием со вторичной плазмой;

- возникновением ионной фокусировки и стягиванием широкого электронного пучка в пучок значительно меньшего диаметра;

- формированием ионов различных газов, способствующих изменению химического состава и структуры материала мишени (происходящими азотированием, окислением и т.д.). Интенсивность всех указанных процессов снижается с уменьшением давления в рабочей камере, что и является основным методом устранения влияния этих процессов на электронный пучок. Поскольку для переплава материалов медицинского назначения наиболее существенным является сохранение химического и структуры материала, то для исключения азотирования, окисления и других процессов, переплав целесообразно проводить в атмосфере инертных газов, которые не вступают в реакции с парами металлов и не вызывают изменения физико-химических свойств материала, в том числе и поверхностных.

На основании предполагаемых параметров газоразрядных устройств проведен расчет системы электропитания по основным направлениям: мощность питающего узла, помехозащищенность, скорость переключения, возможность компьютерного управления устройством, защита устройства при возможных перегрузках системы. В результате разработаны электрические схемы унифицированного устройства питания и управления газоразрядной системой, предусматривающие автоматический поджиг и горение сильноточного газового разряда (в том числе и дугового) с заданными параметрами. Изготовлена силовая часть блока питания разряда и выполнена отладка и регулировка схемы его управления и переключения, получены основные параметры блока питания разряда.

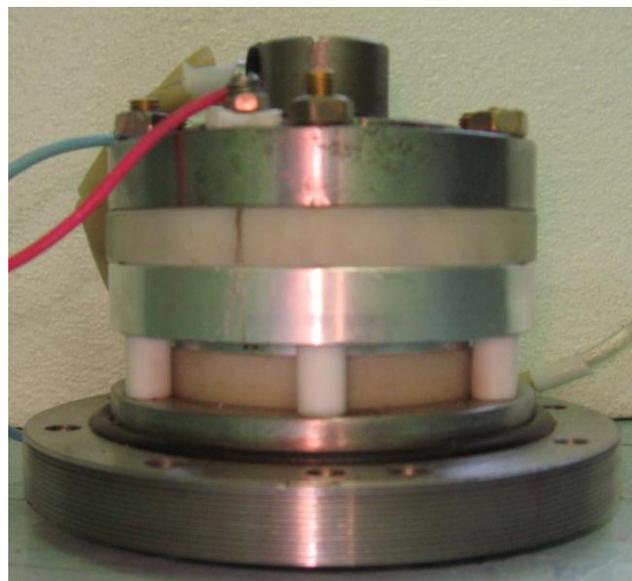
Предложены несколько вариантов конструкций плазменных эмиттеров на основе разрядов с полым катодом в скрещенных  $E \times H$  полях, которые могут обеспечить получение электронных пучков с мощностью до 10 кВт. Наличие магния в разряде обеспечило снижение критической для формирования дуги плотности тока до  $5 \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup>. С целью повышения надежности газоразрядной структуры постоянные магниты, формирующие магнитное поле в разрядной камере, установлены во внешней его части (рисунок 1 а), а требуемая конфигурация магнитного поля достигалась специальными магнитопроводами.

Получение электронных пучков повышенной мощности возможно и с помощью плазменных эмиттеров на основе тлеющего разряда. Предельный ток тлеющего разряда 1,5 А ограничен переходом в дуговой режим, что ограничивает и максимальную мощность электронных пучков, формируемых в плазменных эмиттерах с тлеющим разрядом. При ускоряющем напряжении 30 кВ мощность электронных пучков не превысит 10 кВт. Однако вследствие более высокой стабильности режима горения разряда в тлеющем режиме такие

плазменные эмиттеры могут найти более широкое применение в сравнении с дуговыми эмиттерами. Для получения электронных пучков повышенной мощности необходимо обеспечить формирование газового разряда с током порядка 1 А. В качестве базовой конструкции такого плазменного эмиттера использовалась разрядная структура, внешний вид которой представлен на рисунке 1 б.



а



б

Рис. 1. Внешний вид плазменных эмиттеров на основе дугового разряда

## Материалы и методики

В работе использовались образцы из сплава HS-21 «Carpenter Technology Corporation» (США), вырезанные из заготовок диаметром 22 и 40 мм. Заготовки в виде прутка изготовлены горячим изостатическим прессованием мелкодисперсного порошка высокоуглеродистого и азотсодержащего сплава Co-Cr-Mo (61,79 масс. % Co; 29,5 Cr; 6,6 Mo; 0,23 C; 0,14 N; 0,7 Mn и Si; 0,14 Ni; 0,07 Fe; остальное O, P, S, Cu, Al, Ti, W, B).

Существует различные схемы получения отливок методом ЭЛП. Электронно-лучевой переплав с получением мерных отливок кристаллизацией в медной форме связан с преодолением ряда трудностей. Одна из них – характер протекания процесса ЭЛП материала отходов и бракованных заготовок, содержащих на поверхности значительное количество окислов и глубокие трещины с загрязнениями. Переплав материала сопровождается взрывным выбросом посторонних включений. Еще одной проблемой является достижение гладкой и беспористой поверхности отливки.

Нами использованы схемы оплавления поверхности заготовки, а также литья в медный кристаллизатор и переплава в последнем. Образцы подвергали оплавлению на глубину 1-5 мм с сохранением остальной части в твердом состоянии (при этом они располагались на медной подложке), а также расплавлению всего объема бракованных заготовок, имеющих окисленную поверхность и глубокие трещины, с формированием затвердевшей отливки в медном кристаллизаторе. Длительность воздействия электронного луча для оплавления заготовки составляла ~ 10 с, при переплаве ~ 1 - 3 мин.

Изменение пластических свойств оценивали по твердости материала, а также путем деформирования заготовок горячим выдавливанием поковок головок на кривошипном прессе КБ 9534 с усилием 2500 кН. Поковки головок эндопротеза тазобедренного сустава

разрезали вдоль оси и проводили металлографические исследования. Фазовый рентгеноструктурный анализ осуществляли на установке ДРОН-3.

### Экспериментальная часть

Нагрев лучом поверхности заготовки с ее оплавлением значительно снижает твердость Co-Cr-Mo сплава, в среднем до 33 HRC в зоне оплавления, а в некоторых точках до 24-30 HRC. Это, вероятно, связано с частичным удалением из сплава нежелательных примесей, а также азота, углерода и хрома. Для сравнения, твердость сплава после закалки с температуры 1250°C (при полном растворении карбидов и  $\sigma$ -фазы в твердом растворе) значительно выше (35-37 HRC). Следует отметить, что по высоте оплавленного образца твердость также изменяется - увеличивается при удалении от поверхностного оплавленного слоя к наименее нагретому слою, соприкасавшемуся с медной подложкой.

При литье в медный кристаллизатор отливка имеет мелкозернистую структуру (рис. 2 а) без видимых включений (карбидов и  $\sigma$ -фазы), что, вероятно, связано с высокой скоростью охлаждения расплава. После переплава в медном кристаллизаторе отливка имеет блестящую белую поверхность, в структуре – дендриты и зерна (рис. 2 б). Зерна вытянуты от поверхности отливки к ее центру. Также в структуре присутствует  $\sigma$ -фаза, карбидов в материале отливки не обнаружено (рис. 4 а). Твердость материала неравномерная (пределах 22-28 HRC). Усадочная раковина отсутствует. Относительно круглая форма  $\sigma$ -фазы дает основание полагать, что при последующей деформации вероятность растрескивания отливки ниже.

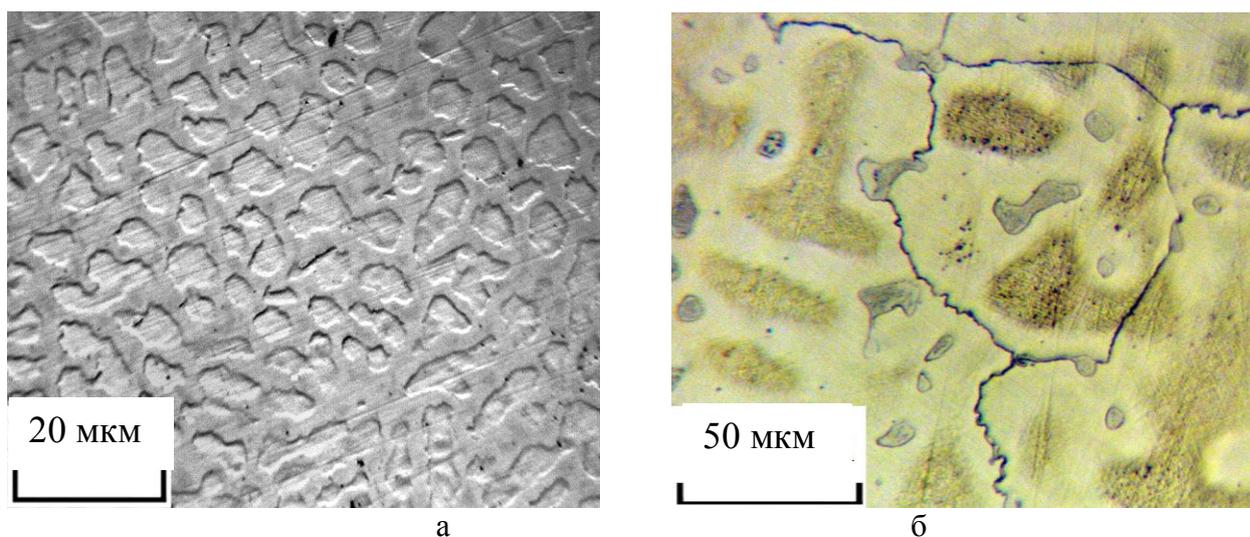


Рис. 2. Структура отливок из Co-Cr-Mo сплава при литье (а) и переплаве (б) в медном кристаллизаторе

При индукционном нагреве под деформацию с относительно высокой скоростью перераспределение легирующих элементов не успевает завершиться. Поэтому после пластической деформации отливки, полученной ЭЛП, структура осталась дендритной (рис. 3 а) с характерной текстурой в местах наибольших локальных деформаций (рис. 3 б) и с включениями  $\sigma$ -фазы и карбидов (рис. 4 б). Появление карбидов после деформации означает, что при ЭЛП углерод выгорает не полностью. Твердость по объему поковки также неоднородная (30-36 HRC), что, скорее всего, обусловлено различием величины локальных деформаций по объему поковки. Результаты измерения твердости дают основание полагать, что материал после обработки давлением упрочняется.

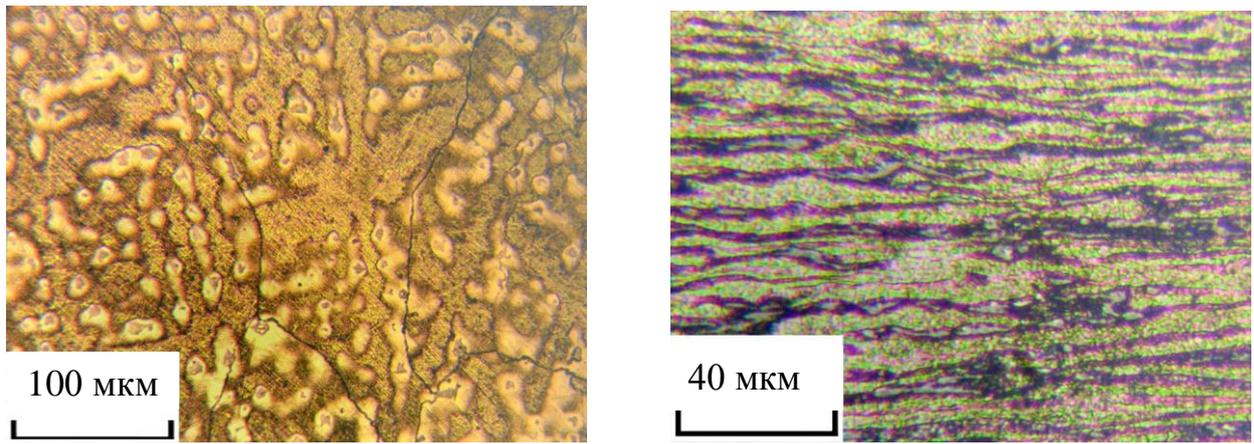


Рис. 3. Структура поковок из Co-Cr-Mo сплава в местах с малыми (а) и большими (б) локальными деформациями

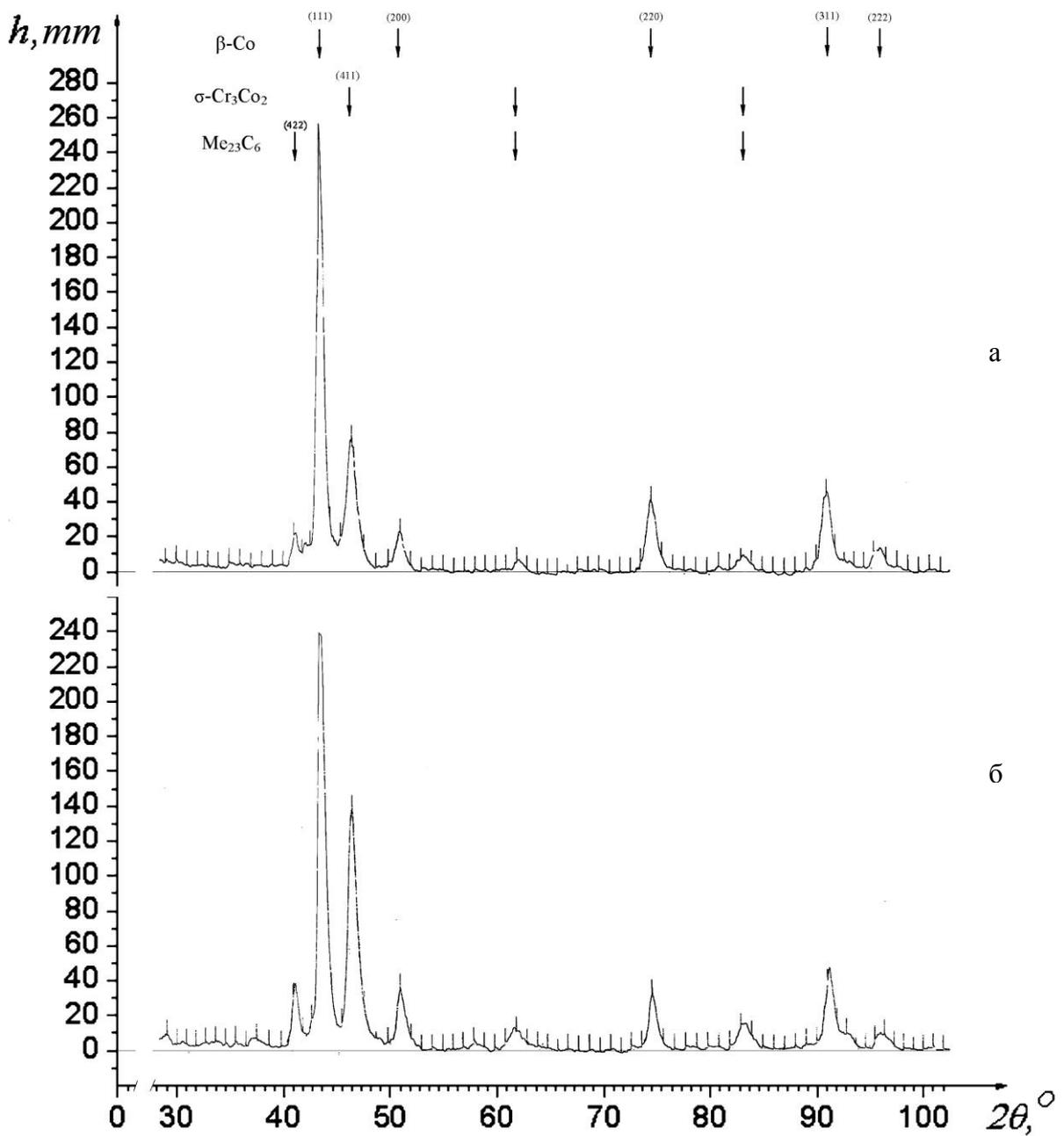


Рис. 4. Рентгенограмма отливки (а) и поковки (б) из Co-Cr-Mo сплава

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения ЭЛП как для повышения технологических свойств, так и получения заготовок для штамповки и выдавливания, применительно к медицинским имплантатам для эндопротезирования. Вместе с тем, необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния режимов электронно-лучевого переплава на химический состав, механические и технологические свойства сплава, а также на оптимизацию технологического процесса переплава отходов с целью сокращения длительности воздействия электронного луча.

## Список литературы

[1]. Гордиенко А.И., Анищик В.М., Красиков В.Л. Материалосберегающая технология изготовления деталей медицинских имплантатов из металлических материалов// Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: 6-я Междунар. науч.-техн. конф. / под. ред. А.И. Свириденка и В.А. Бородули.- Гродно: ГрГУ, 2005 — С. 36.

[2]. Лисицин В.Ф. Безникелевые коррозионностойкие сплавы. Разработка и применение // Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Минск, 2005. – 195 с.

[3]. Поболь И.Л., Красиков В.Л. Электронно-лучевая обработка Co-Cr-Mo сплава// Труды международной научно-технической конференции «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение», 25-26 апреля 2006. - М.: ВИАМ, 2006 - С.353-355.

[4]. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А.. Электроннолучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1973 – 240 с.

[5]. Grusdev V.A., Zalesski V.G., Antonovich D.A., Golubev Yu.P. Universal plasma electron source // Vacuum, 2005. V. 77. - P. 399–405.