

## ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОЛЕННЫХ ПРОТЕЗОВ

*Представлены история и предлагаемые технологии отечественного проекта изготовления экзогенного коленного протеза. Предложены результаты, литейные и альтернативные технологии и материалы для промышленной реализации.*

**Ключевые слова:** экзогенные протезы, коленные суставы, материалы протезов, технологии протезирования, 3d - прототипирование.

### Цель

Для консолидации народной помощи солдатам, добровольцам, отдавшим свое здоровье при защите народа Украины, и пострадавшим мирным жителям, с целью проектирования и производства экзогенных и эндогенных протезов для нижних и верхних конечностей и протезов суставов была создана Волонтерская группа «Украинский протез». Участники группы считают, что конструкторский и производственный потенциал Украины достаточен для того, чтобы обеспечить мирных жителей и воинов, пострадавших в АТО, современным протезированием с полным циклом производства в Украине. Для реализации программы протезирования нужно объединить и скоординировать усилия украинских ученых, конструкторов, производственников и медиков, найти спонсоров для протезирования каждого из нуждающихся в помощи.

### История проекта

В сентябре 2014 г. группа начала работу над созданием экзогенного (для полностью потерявших большую часть ноги) протеза коленного сустава 4–5 поколения. Ставится цель создания интеллектуальных протезов с биоуправлением от импульсов мозга. Усилиями участников волонтерской группы и организаций, поддерживающих проект, в начале декабря 2014 года была изготовлена имитационная рабочая модель протеза из пластика и металла, которая была продемонстрирована на выставке «3D Печать» в Торгово-промышленной палате Украины.

Инициаторами идеи создания протезов выступили Скориков Александр Анатольевич, доценты КПИ Киричук Ю. В. и Самарай В. П. Проектирование модели было произведено доцентом КПИ Киричуком Юрием Владимировичем, изготовление пластиковых деталей рабочей модели протеза произведено компанией «SmartPrint 3D» под руководством Евгения Кожуховского.

В январе 2015 года Всеукраинской организацией «HighTech Initiative» под руководством ее президента Мазнюка Виктора Михайловича была создана инфор-

мационная платформа для поддержки работ волонтерской группы – сайт [WWW.PROTEZ.ORG.UA](http://WWW.PROTEZ.ORG.UA).

Силами участников проекта проектируются и проверяются разные виды регуляторов – гидро-, пневмо-, микроконтроллерные. Планируется отработка нескольких режимов работы протезов:

- Адаптация инвалида – режим «Стояния»;
- Ходьба;
- Бег;
- Велосипед;
- Отдых.

Ведется работа по оптимизации системы регулирования протеза и расчетов разных регуляторов. Для этого ведется работа по идентификации объекта управления «Коленный сустав» с целью идентификации объекта управления по кривым разгона и получения наиболее адекватных динамических математических моделей коленного сустава в виде передаточных функций и дифференциальных уравнений для описания нагрузок во время движения.

К концу февраля 2015 г. силами ПАО «КЦКБА» («Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» – предыдущие названия «АРМА», УФ ЦКБА и «Арматурный завод») под руководством Крепака Сергея Александровича изготовлен первый цельнометаллический протез коленного сустава. Для опробования протезов двумя пострадавшими бойцами АТО и человеком, потерявшим ногу в мирное время, планируется изготовить следующую серию протезов.

К концу декабря 2015 г. на кафедре литейного производства черных и цветных металлов НТУУ «КПИ» для отработки литейной технологии и оригинальных решений были изготовлены первые металлические образцы отливок деталей протеза, а к концу февраля 2015 г. были спроектированы первые пробные варианты пресс-форм для серийного изготовления отливок деталей протеза методом литья по выплавляемым моделям.

В 2015 г. силами ПАО «КЦКБА» («Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» – предыдущие названия «АРМА», УФ ЦКБА и «Арматурный завод») под руководством Крепака Сергея Алек-

сандровича изготовлены новые версии протезов и детали цельно-металлических протезов других версий коленного сустава.

В 2015–2016 гг. силами ПАО «Меридиан» изготовлен протез из легких алюминиевых сплавов.

В 2015–16 гг. силами волонтеров изготовлены детали протеза из магниевого сплава МЛ5.

В дальнейшем параллельно с апробированием протезов первой серии будут вестись другие работы по развитию коленного и других протезов:

- будут проводиться испытания протеза в специально сертифицированной лаборатории «НАДІЙНІСТЬ» НТУУ «КПІ»;

- будет проектироваться и изготавливаться усовершенствованная литейная и технологическая оснастка для серийного изготовления протезов;

- будет производиться сбор финансовых средств на изготовление второй серии протезов.

### Технологии

Для массового производства предполагается изготовление деталей протеза коленного сустава на различных заводах и различными методами:

- методами литья;
- методами порошковой металлургии;
- методами прототипирования – 3D печать;
- при необходимости методы деформирования (объемная или листовая штамповка);
- при необходимости методы сварки;

Для этого необходимо решить вопросы согласования между требованиями конструирования и возможностями технологий.

### Литейные технологии

Предполагается изготовление как минимум трех деталей протеза коленного сустава методами литья. Для этого необходимо решить четыре основных вопроса, которые будут согласованы между требованиями конструирования и возможностями технологий.

1 Материал отливки и соответственно готовой детали

Предполагается испытать несколько материалов:

1.1. Обычные углеродистые стали согласно чертежей: Сталь30, сталь 40, сталь 45.

Преимущества: а) дешевизна; б) возможность закалки для увеличения твердости. Недостатки: а) корродирует; б) невозможность организовать массовое или крупносерийное производство методом литья под давлением; в) тяжелый сплав – большая плотность.

1.2. Нержавеющие стали.

Преимущества: а) не корродирует; б) относительная дешевизна. Недостатки: а) дороже углеродистой стали; б) невозможность организовать массовое или крупносерийное производство методом литья под давлением; в) тяжелый сплав – большая плотность.

1.3. Алюминиевые сплавы типа Силумин АК12 или другие.

Преимущества: а) не корродирует; б) дешевизна – *самый дешевый из металлических сплавов* – дешевле стали; в) малая плотность – легче стали и высокопрочного чугуна; льется под давлением – возможность организовать массовое или крупносерийное производство методом литья под давлением. Недостатки: а) прочность ниже, чем у углеродистой стали.

1.4. Высокопрочный чугун.

Преимущества: а) имеет плотность меньше стали и соответственно имеет меньший вес. По прочности он не уступает стали и даже превосходит. Недостатки: а) невозможность организовать массовое или крупносерийное производство методом литья под давлением; в) тяжелый сплав – большая плотность.

1.5. Магниеые сплавы.

Преимущества: а) легкий сплав, б) льется под давлением. Недостатки: тяжело лить – легко возгорается – огнеопасен.

1.6. Титан.

Преимущества: а) легкий; б) не корродирует. Недостатки: а) очень дорогой; б) не льется под давлением.

### 2 Методы литья

Предполагается задействовать несколько методов литья:

2.1. Литье под давлением (ЛПД).

Преимущества: а) самое высокое качество поверхности (товарный вид) и всей отливки; б) самая высокая производительность; в) самые высокие возможности автоматизации процесса литья под давлением (ЛПД).

Недостатки: а) самая высокая стоимость изготовления пресс-формы; б) дороже обслуживание оборудования.

2.2. Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ).

Преимущества: а) низкая стоимость изготовления пресс-формы; б) возможность литья любых сплавов, в т. ч. легких (алюминиевые и магниевые сплавы) и тяжелых сплавов (углеродистой и нержавеющей стали и высокопрочного чугуна, титана).

Недостатки: а) малая производительность (длительный цикл изготовления одной отливки – нанесение 5–7 огнеупорных слоев в течение нескольких дней); б) большое количество дополнительных материалов (этилсиликат; спирт; соляная кислота; маршалит; ацетон; серная кислота).

2.3. Литье по выжигаемым моделям (ЛГМ).

Преимущества: а) низкая стоимость изготовления пресс-формы; б) производительность выше, чем при ЛВМ; в) возможность литья любых сплавов, в т.ч. легких (алюминиевые и магниевые сплавы) и тяжелых сплавов (углеродистой и нержавеющей стали и высокопрочного чугуна; титана).

Недостатки: а) экологические ограничения и ухудшенные санитарно-гигиенические условия; б) производительность ниже, чем при ЛПД.

2.4. Кокильное литье

Преимущества: а) высокое качество поверхности

(товарный вид) и всей отливки; б) высокая производительность; в) самые высокие возможности автоматизации процесса литья.

а) низкая стоимость изготовления пресс-формы; б) производительность выше, чем при ЛВМ; в) возможность литья в ОБЛИЦОВАННЫЙ КОКИЛЬ – возможность литья любых сплавов, в т. ч. легких (алюминиевые и магниевые сплавы) и тяжелых сплавов (углеродистой и нержавеющей стали и высокопрочного чугуна).

Недостатки: а) высокая стоимость изготовления пресс-формы.

3 Доработка толщины стенок (согласованное уменьшение) и конфигурации отливок в соответствии с требованиями литейной технологии и уменьшения веса протеза:

3.1. Литейные уклоны

3.2. Припуски на мехобработку

3.3. Изменение конфигурации нетехнологичных частей

3.4. Литейные радиусы

3.5. Согласование разъема между полуформами

4 Проектирование и изготовление оснастки (пресс-форм):

4.1. ЛПД

4.2. ЛВМ

4.3. ЛГМ

Таким образом, будут изготовлены отливки деталей протеза из всех указанных металлических сплавов, изготовлена все виды оснастки (пресс-формы) и опробованы все три указанных метода литья в связи:

а) с невозможностью или нецелесообразностью использования каждого из методов литья для каждого из сплавов;

б) с необходимостью сравнить качество литья, литейные, прочностные, технологические и пластические, вязкостные свойства и характеристики, твердость;

в) с необходимостью отработать каждый из способов для литья каждого конкретного сплава;

г) с необходимостью иметь запасные уже отработанные способы изготовления (методы литья);

д) с необходимостью иметь несколько запасных комплектов оснастки для одновременной работы на нескольких производственных площадках.

Необходимое оборудование

1. 3D – принтер для изготовления выплавляемых моделей (из воска).

2. Центробежная литейная машина для заливки методами ЛВМ (литья по выплавляемым моделям) и ЛГМ (литья по газифицируемым моделям).

3. Вибростол для уплотнения литейных форм мето-

дами ЛВМ (литья по выплавляемым моделям) и ЛГМ (литья по газифицируемым моделям).

4. Печь универсальная термическая для подготовки литейных форм.

5. Машина литья под давлением.

### Необходимые материалы

1. Металлическая шихта для сплавов – сталь углеродистая и нержавеющая, высокопрочный чугун, силумины, титан, магниевые сплавы.

2. Вспомогательные материалы: песок, маршалит, этилсиликат, ацетон, спирт, соляная и серная кислота.

3. Восковый материал для 3d- принтеров.

4. Воск литейный.

5. Невспененный пенополистирол.

Необходимая оснастка

1. Пресс-формы литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

2. Пресс-формы литья по газифицируемым моделям (ЛГМ).

3. Пресс-формы литья под давлением (ЛПД).

Запланировано дальнейшее использование и совершенствование технологий прототипирования для изготовления и литейного производства протезов

1. печать контрольных деталей

2. печать 3D – литейных форм для технологии литья по выплавляемым моделям ЛВМ

3. печать выплавляемых 3D-моделей будущих отливок из восковых смесей на специальных 3D-принтерах для технологии литья по выплавляемым моделям ЛВМ

4. печать выплавляемых 3D-восковых моделей будущих отливок пресс-форм для ЛВМ на специальных 3D – принтерах для ЛВМ.

### Выводы

1. Результатами работы стали отливки в разовые формы и разработка проектов пресс-форм.

2. В результате работы изготовлены три версии полностью готовых протезов.

3. Проект находится в большой степени готовности для промышленной реализации.

4. В перспективе при возможности или необходимости возможно изготовление отдельных деталей протезов из титана и сплавов методами порошковой металлургии.

5. Возможно изготовление отдельных деталей протезов из титана и сплавов с использованием прототипирования из титанового порошка.

6. Ставится цель создания интеллектуальных протезов с биоуправлением от импульсов мозга.





Рис. 15–18. Модель и отливка «Рычаг-2»



Рис. 19–22. Модель и разовая песчано-глинистая форма для детали «Рычаг-2»



Рис. 23–24. Модель и разовая песчано-глинистая форма для детали «Колено»



Рис. 25–27. Силиконовые формы для изготовления восковых моделей для метода литья по выплавляемым моделям (ЛВМ)

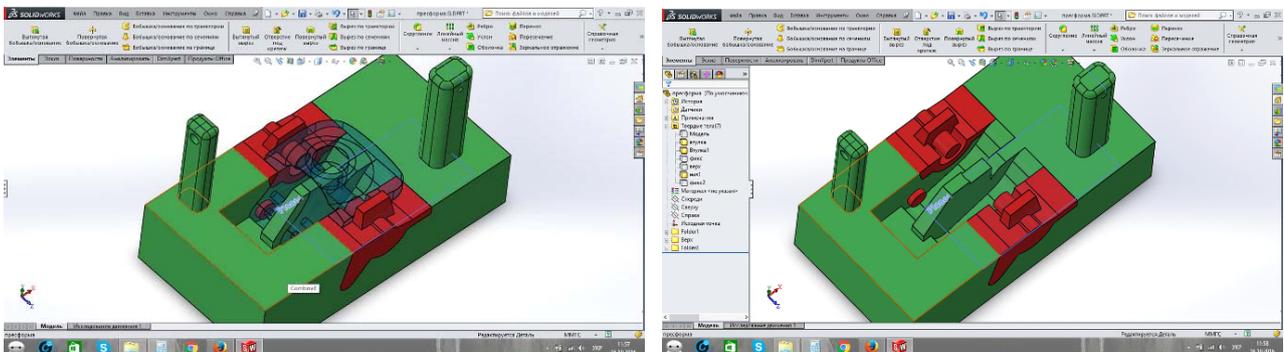


Рис. 28–29. 3D-пресс-форма литья восков для деталей протеза

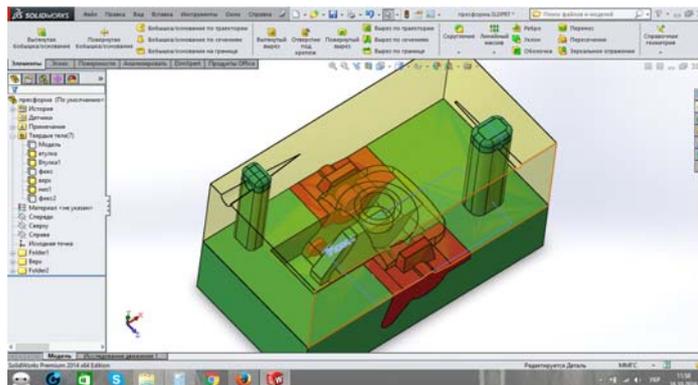


Рис. 30. 3D-пресс-форма лиття восковок в сборе

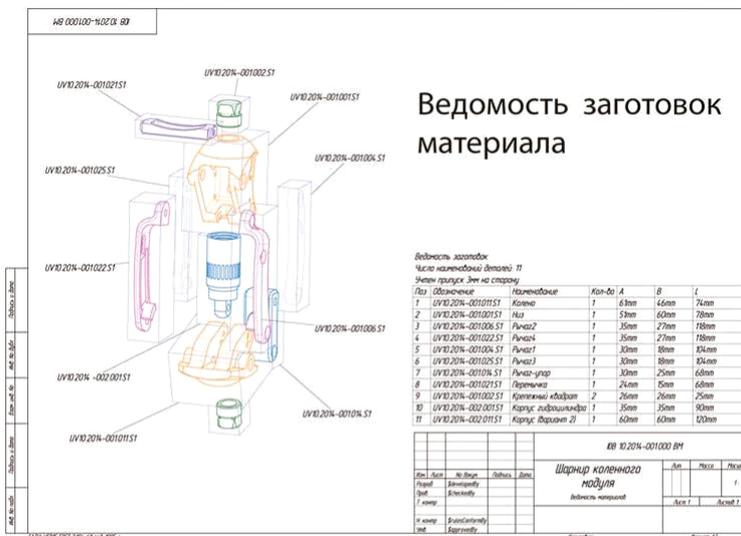


Рис. 31. Ведомость заготовок материалов

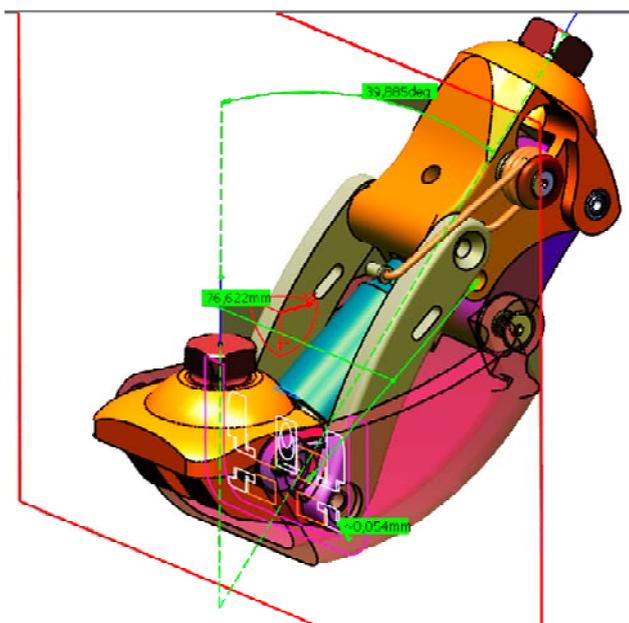


Рис. 32. Экзогенный протез коленного сустава

### Список литературы

1. Прохоров Н. Л. Новое поколение технических средств реабилитации / Прохоров Н. Л., Знайко Г. Г., Красовский В. Е. // Приборы. – 2016. – № 7 (193). – С. 1–10.
2. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении : Учеб. пособие для машиностроительных вузов по специальности «Машины и технология литейного производства» / В. М. Воздвиженский, В. А. Грачев, В. В. Спасский. – М. : Машиностроение, 1984. – 432 с.
3. Чепенюк Е. А. Механизм искусственного полицентрического коленного сустава трансформального протеза с переменной геометрии / Чепенюк Е. А., Поляков А. М. // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Вип. 137/2013. Серія : Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2013. – С. 383–387.
4. Акулов С. А. Основы теории биотехнических систем / Акулов С. А., Федотов А. А. – М. : ФИЗМАТЛИТ. 2014. – 259 с.
5. Буниатян Л. М. Проектирование системы управления искусственной руки с учетом динамики исполнительных двигателей / Буниатян Л. М. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2013. – Т. LXVI, № 1. – С. 35–44.
6. Баумгартнер Р. Ампутация и протезирование нижних конечностей / Р. Баумгартнер, П. Бота ; под ред. А. Н. Кейера ; пер. с нем. – М. : Медицина, 2002. – 486 с.
7. Фарбер Б. С. Теоретические основы построения протезов нижних конечностей и коррекции движения / Фарбер Б. С., Витензон А. С., Морейнис И. Ш. ; под ред. Б. С. Фарбера, кн. 2. – М. : ЦНИИПП, 1994. – 558 с.
8. Левшин Г. Е. Применение магнитного формообразования в протезировании / Левшин Г. Е., Мамаев К. В., Хлопков В. В. // Проблемы и перспективы развития литейного производства : сб. науч. тр. / Под ред. Проф. В. А. Маркова. – Вып. 1. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – 276 с.
9. Халикова К. К. Дефекты моделей при ЛВМ и способы их устранения / Халикова К. К. // Всероссийская научно-техническая конференция студентов «Студенческая научная весна : Машиностроительные технологии». – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012.

Одержано 16.12.2016

### Самарай В.П. Ливарні технології колінних протезів

*Представлено історію та запропоновано технологію вітчизняного проекту виготовлення екзогенного колінного протезу. Запропоновано результати, ливарні й альтернативні технології і матеріали для промислової реалізації.*

**Ключові слова:** *екзогенні протези, колінні суглоби, матеріали протезів, технології протезування, 3d - прототипування.*

### Samarai V. Foundry technology knee prostheses

*The history and the technology offered by the domestic production of exogenous project knee prosthesis are presented. Proposed results, casting and alternative technologies and materials for industrial implementation are proposed.*

**Key words:** *exogenous prostheses, knee joints, prosthetic materials prosthetics technology, 3d - prototyping.*

---