

Рис. 6. Опытные образцы с металлокерамическими покрытиями с использованием порошкового материала на основе системы «оксид алюминия-алюминий»

Полученные покрытия имели высокие прочность сцепления со стальной подложкой, ударную прочность и коррозионную стойкость. Лазерное оплавление полученных газотермическими методами покрытий сопровождалось существенным повышением твердости и износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы переработки солевых шлаков алюминиевого производства для получения порошкового материала с высоким содержанием алюмооксидных фаз / Б. М. Немененок, И. В. Рафальский, П. Е. Лущик [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 4. – С. 88–96.
2. **Рафальский, И. В.** Плазменное напыление композиционных покрытий на основе системы Al_2O_3-Al / И. В. Рафальский, А. Д. Руленков, О. Г. Девожно // *Литье и металлургия*. – 2023. № 4. – С. 88–93.
3. **Руленков, А. Д.** Свойства покрытий системы Al_2O_3-Al , полученных с использованием дисперсных материалов, синтезированных из литейных алюмоматричных композиций / А. Д. Руленков, И. В. Рафальский, П. Е. Лущик [и др.] // *Металлургия: респуб. межвед. сб. науч. тр.* – Мн., 2024. – Вып. 45. – С. 61–72.
4. **Рафальский, И. В.** Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И. В. Рафальский. – Мн., 2016. – 308 с.

REFERENCES

1. **Nemenenok B. M., Rafal'skij I. V., Lushhik P. E., Dolgij L. P., Rulenkov A. D.** Processy pererabotki solevyh shlakov aljuminievo-go proizvodstva dlja poluchenija poroshkovogo materiala s vysokim sodержaniem aljumooksidnyh faz [Processes for processing salt slags from aluminum production to obtain powder material with a high content of alumina phases]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 4, pp.88–96.
2. **Rafal'skij I. V., Rulenkov A. D., Devojno O. G.** Plazmennoe napylenie kompozicionnyh pokrytij na osnove sistemy Al_2O_3-Al [Plasma spraying of composite coatings based on the Al_2O_3-Al system]. *Lit'e i metallurgija. = Foundry production and metallurgy*, 2023, no. 4, pp. 88–93.
3. **Rulenkov A. D., Rafal'skij I. V., Lushhik P. E., Devojno O. G.** Svojstva pokrytij sistemy Al_2O_3-Al , poluchennyh s ispol'zovaniem dispersnyh materialov, sintezirovannyh iz litejnyh aljumomatrichnyh kompozicij [Properties of Al_2O_3-Al coatings obtained using dispersed materials synthesized from cast aluminum matrix composites]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers*, Minsk, BNTU Publ., 2024, Vyp. 45, pp. 61–72.
4. **Rafal'skij I. V.** Resursosberegajushhij sintez splavov na osnove aljuminija s ispol'zovaniem dispersnyh nemetallicheskih materialov i intellektual'nye metody kontrolja metallurgicheskikh processov ih poluchenija [Resource-saving synthesis of aluminum-based alloys using dispersed non-metallic materials and intelligent methods for controlling metallurgical processes for their production]. Minsk, BNTU Publ., 2016, 308 p.



УДК 669.255; 621.78; 617–7:67.02

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК ЭНДОПРОТЕЗОВ КОЛЕННОГО СУСТАВА МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CO–CR–MO

Л. П. ДОЛГИЙ, Д. И. МАЦИНОВА, С. В. МАРЦЕВА, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: litteh@bntu.by

В работе проанализированы факторы, определяющие выбор сплава и технологии получения металлических элементов эндопротезов коленного сустава, а также технологические процессы получения формовочных моделей. Разработаны и построены трехмерные макет-модели типоряда верхней и нижней частей имплантатов коленного сустава человека, получены результаты имитационного моделирования заливки сплава системы Co–Cr по предлагаемой технологии.

Ключевые слова. Сплавы системы Co–Cr; индукционная вакуумная плавка, имплантаты, биосовместимость, CAD-модели, имитационное моделирование.

PRODUCTION OF KNEE JOINT REPLACEMENT BLANKS BY CASTING FROM ALLOYS OF THE CO–CR–MO SYSTEM

L. P. DOLGI, D. I. MATSINOVA, S. V. MARTSEVA, I. V. RAFALSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: litteh@bntu.by

The paper analyzes the factors determining the choice of alloy and technology for the production of metal elements of knee arthroplasty, as well as the technological processes for obtaining molding models. Three-dimensional mock-up models of the order of the upper and lower parts of human knee implants have been developed and constructed, and the results of simulation modeling of the casting of the alloy of the Co–Cr system according to the proposed technology.

Keywords. Alloys of the Co–Cr system, induction vacuum melting, implants, biocompatibility, CAD models, simulation modeling.

В настоящее время ведутся различные исследования по изготовлению металлических элементов эндопротезов. Наибольшее внимание уделяется вопросам обеспечения биосовместимости, повышения долговечности, износо- и коррозионной стойкости. Несмотря на активное внедрение технологий аддитивного производства, совершенствование технологии литья как одного из основных методов изготовления изделий медицинского назначения остается востребованным направлением.

В качестве плавильного агрегата выбрана индукционная вакуумная печь. Общим преимуществом плавки в вакуумных печах является пониженное содержание газов и неметаллических включений в получаемом металле. В вакуумных индукционных печах обычно используется средний вакуум от 0,015 Па. Известно, что при плавке в вакууме ряд физико-химических процессов имеют специфические особенности: интенсивно выделяются растворенные газы из расплавленного металла, заметно испаряются как основные компоненты сплава, так и их примеси с высокой упругостью пара [1].

В последние годы пристальное внимание уделяется вопросам исследования биомедицинских сплавов системы Co–Cr–Mo, которые представляют собой многокомпонентные системы с различными составами легирующих элементов (Mo, W, Ni, Ti и др.) [2]. Следует отметить, что сплавы данного класса сложнолегируются, при этом каждый легирующий компонент придает сплаву определенные свойства:

- кобальт повышает твердость, улучшая, таким образом, механические качества сплава;
- хром придает сплаву твердость и повышает антикоррозионную стойкость, образуя пассивирующую пленку на поверхности сплава;
- молибден повышает прочность сплава за счет придания ему мелкозернистости;
- никель повышает пластичность, вязкость, ковкость сплава, улучшая тем самым его технологические свойства;
- марганец увеличивает прочность, качество литья, понижает температуру плавления, способствует удалению токсичных зернистых соединений из сплава;

- углерод снижает температуру плавления и улучшает жидкотекучесть сплава;
- кремний улучшает качество отливок, повышает жидкотекучесть сплава;
- железо повышает жидкотекучесть, увеличивает качество литья.

Биосовместимые имплантаты из сплавов на основе Co–Cr–Mo в сравнении с другими применяемыми в данной области материалами обладают более высокими показателями физико-механических свойств и коррозионной стойкости, превосходящими нержавеющую сталь, и являются более износостойкими при работе в парах трения с другими элементами эндопротеза по сравнению с имплантатами из титановых сплавов.

Для изделий медицинского назначения, где наличие примесей строго регламентировано, было решено использовать готовые сертифицированные сплавы заданного химического состава, поскольку использование в качестве шихтовых материалов лигатур, в том числе полученных методом металлотермического восстановления, возможно только после дополнительной металлургической переработки с целью удаления нежелательных примесей, что представляет собой довольно сложный многоступенчатый процесс.

В качестве плавильного устройства использовали вакуумную индукционную плавильную установку Zhengzhou Brother Furnace Co., Ltd (рис. 1).

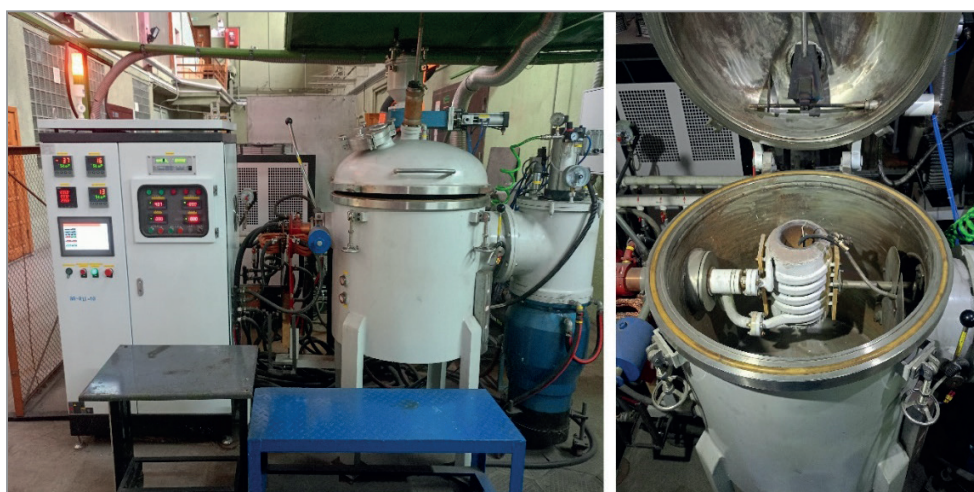


Рис. 1. Вакуумная индукционная плавильная установка Zhengzhou Brother Furnace Co., Ltd

По результатам исследований выявлено, что сплав Co–Cr–Mo, полученный в условиях вакуумной плавки и заливки, имеет высокую плотность, приближающуюся к плотности ковanej заготовки (рис. 2) [3].

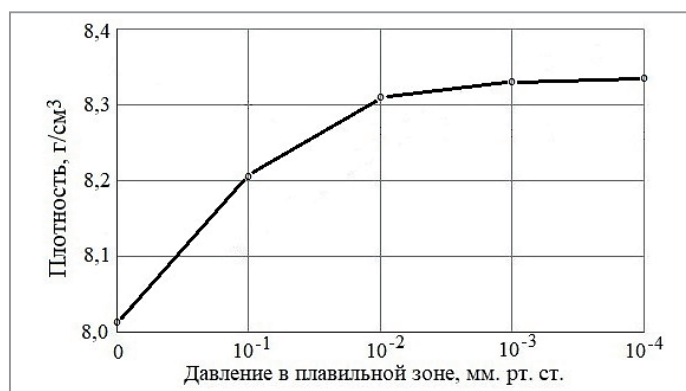


Рис. 2. Влияние вакуумирования на плотность литых образцов

Анализ существующих типоразмеров ортопедических и травматологических имплантатов осуществляли на базе разработок чешской компании ProSpon, специализирующейся на разработке, производстве и распространении имплантатов и хирургических инструментов для ортопедии, травматологии и онкологии.

Для коленного сустава компания ProSpon поставляет изделия для его тотальной первичной замены (модель Vektor) ревизионного типа (модель MMR), а также гвоздь для артродеза сустава (модель Alterna) (рис. 3, 4) [4].

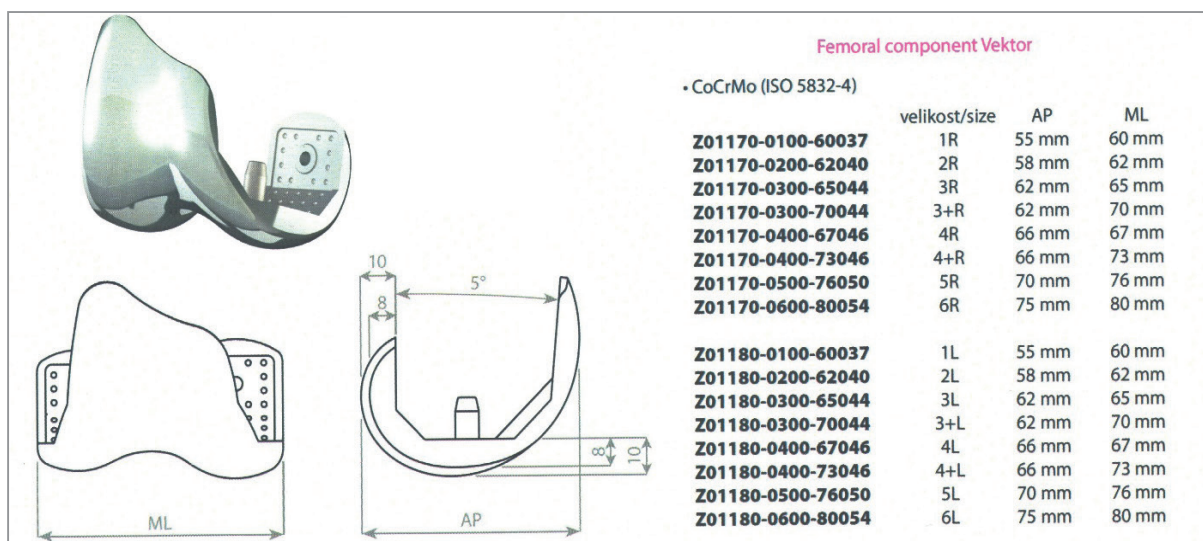


Рис. 3. Типоразмер верхней части имплантатов коленного сустава

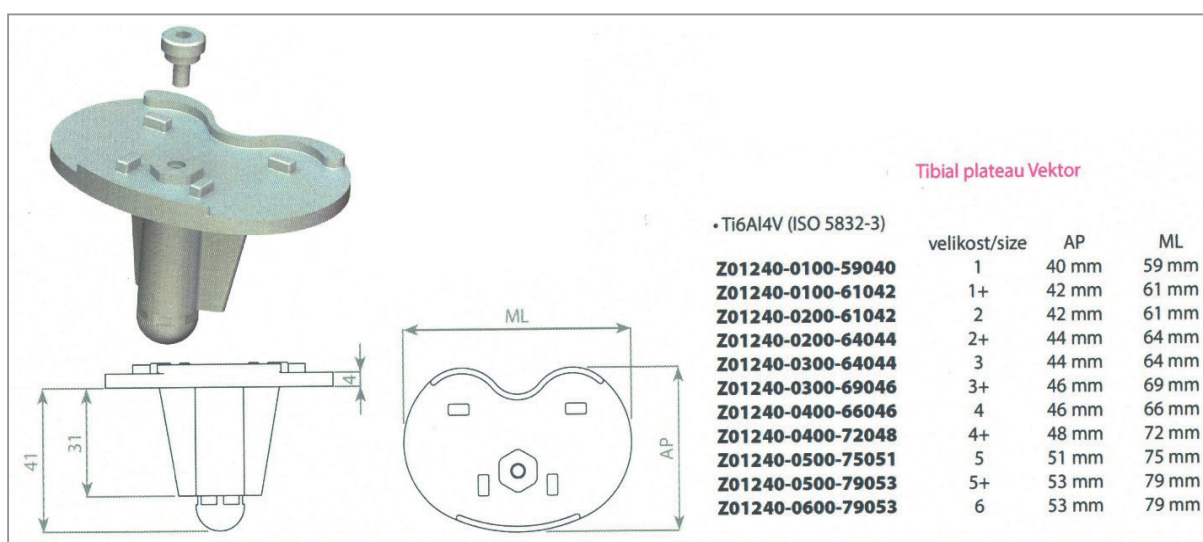


Рис. 4. Типоразмер нижней части имплантатов коленного сустава

В целом существует восемь типоразмеров левого имплантата, восемь размеров правого имплантата верхней части коленного сустава и одиннадцать типоразмеров нижней части коленного сустава человека.

На основании приведенных выше данных авторами разработаны и построены трехмерные модели типоразмера заготовок нижней (11 ступеней) и верхней (8 левых и 8 правых) частей эндопротеза коленного сустава с минимальными припусками на механическую обработку с учетом предварительно выбранной технологии заливки расплава в керамические формы по выплавляемым моделям с термостатическим подогревом (рис. 5, 6).

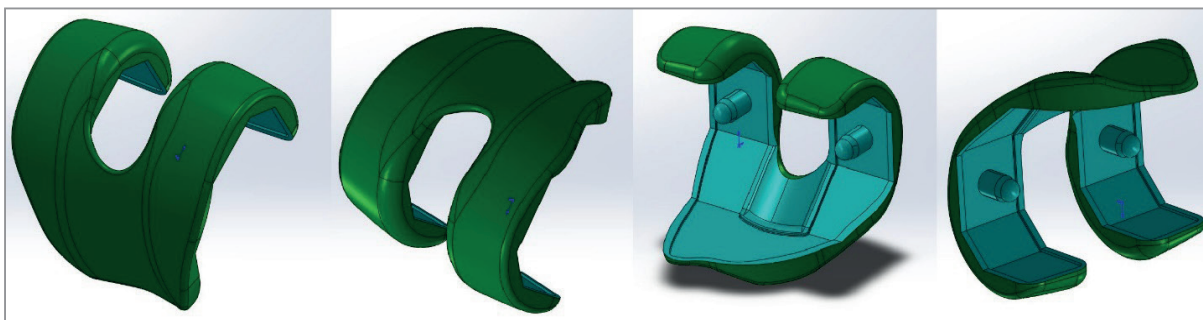


Рис. 5. Трехмерная модель имплантата верхней части коленного сустава

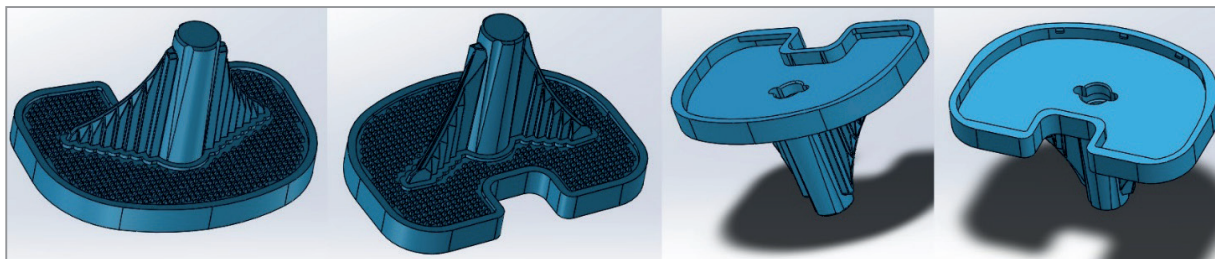


Рис. 6. Трехмерная модель имплантата нижней части коленного сустава

Для разработки технологии комплектования заливочного комплекса при изготовлении керамических форм для литья по выплавляемым моделям с помощью 3D-принтера Creality CR-K1 MAX изготовлены имитационные модели типоразмера № 7 верхней и нижней частей коленного сустава из пластика типа ABS.

Разработаны несколько вариантов трехмерных моделей формовочного комплекса имплантата нижней части коленного сустава (размер № 7) для проведения имитационного моделирования и выбора оптимальной конструкции комплекса по технологическим критериям (рис. 7).

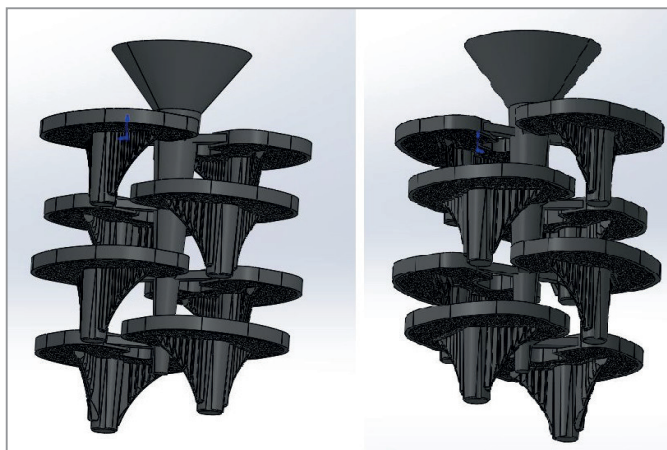


Рис. 7. Конструкция моделей и литниково-питающей системы

В ходе работы учитывали следующие условия плавки и заливки:

- литье в керамические (оболочковые) формы по выплавляемым моделям с термостатическим подогревом;
- вакуумная индукционная плавильная установка;
- плавильная емкость до 6 кг жидкого металла.

С целью программной доработки конструкции и компоновки литейной формы, а также технологического процесса заливки расплава проведены работы по имитационному моделированию заливки жидкого металла в керамические формы (рис. 8).

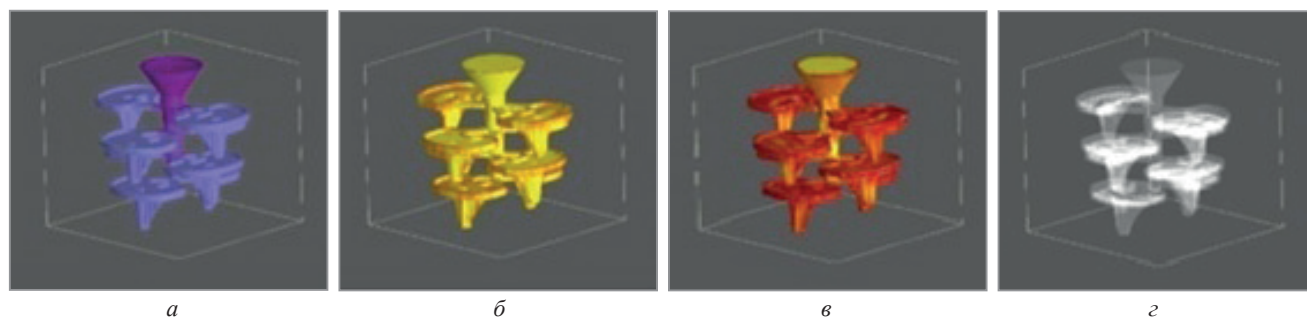


Рис. 8. Результат заливки металла, полученный с помощью имитационного моделирования:
а – температура 20 °С; б – жидкая фаза 94,4%; в – жидкая фаза 71,2%; г – жидкая фаза 0%

Оптимальный результат по итогам имитационного компьютерного моделирования с учетом вышеперечисленных предварительных требований получен при заливке расплава в форму, имеющую шесть моделей – три пары моделей в три ряда на стояке с общей металлоемкостью около 5 кг.