

УДК 669.255; 621.78; 617-7:67.02

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОБАЛЬТОВЫХ
СПЛАВОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

П. Е. ЛУЩИК, канд. техн. наук, **Д. И. КУРАЧ**,
Л. П. ДОЛГИЙ, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет
И. В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

В статье рассмотрены способы изготовления и термообработки сплавов на основе кобальта для получения изделий медицинского назначения. Обсуждаются возможности применения литейных технологий (специальных методов литья), методов обработки давлением, аддитивных технологий для получения заготовок эндопротезов. Рассмотрены особенности влияния термической обработки кобальтовых сплавов в диапазоне температур 850–1230 °С, в зависимости от способа изготовления заготовки, на структуру и физико-механические свойства изделий.

Ключевые слова: изделия медицинского назначения, Co-Cr-Mo сплавы, литье, обработка давлением, SLM-технология, термообработка.

**FEATURES OF THE USE OF COBALT ALLOYS
FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS**

P. E. LUSHCHIK, Ph. D. in Technical Sciences, **D. I. KURACH**,
L. P. DOLGIY, Ph. D. in Technical Sciences
Belarusian National Technical University
I. V. RAFALSKI, Ph. D. in Technical Sciences
Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic"

The article presents methods for the manufacture and heat treatment of cobalt-based alloys for biomedical applications. The possibilities of using foundry technologies (special casting methods), pressure processing methods, and additive technologies to produce endoprosthesis blanks are discussed. The features

of the influence of heat treatment of cobalt alloys in the temperature range of 850–1230 °C, depending on the method of manufacturing the workpiece, on the structure and physical-mechanical properties of products are considered.

Keywords: *biomedical applications, Co-Cr-Mo alloys, casting, pressure treatment, SLM technology, heat treatment.*

Биомедицинские сплавы системы Co-Cr-Mo широко используются в качестве ортопедических имплантатов в коленных суставах и искусственных тазобедренных суставах благодаря высокой биосовместимости, хорошим механическим свойствам, высокой износостойкости и усталостной прочности [1–3]. Сплавы данного типа обычно содержат два вида кристаллических структур: γ -ГЦК фазу (стабильную при высоких температурах, обычно превышающих 900 °C) и ϵ -ГПУ фазу (стабильную при комнатной температуре), с различным соотношением указанных фаз. Размеры зерен существенно влияют на физико-механические свойства этих сплавов [4].

Ортопедические имплантаты из сплавов Co-Cr-Mo, выполняющие функцию костей взамен вышедших из строя твердых тканей, как правило, работают при циклических нагрузках в условиях живого организма. Надежность таких имплантатов после установки во многом определяется их прочностью и вязкостью разрушения. Усталостное разрушение является одной из основных проблем, приводящих к расшатыванию и окончательному разрушению имплантатов [5; 6]. Искусственные суставы из сплавов Co-Cr-Mo в настоящее время все чаще используются у более молодых и активных пациентов, для которых устанавливается значительно больший срок службы эндопротезов в более жестких условиях эксплуатации. Поэтому оценка и улучшение физико-механических свойств сплавов становятся все более актуальными для их надежного использования в качестве долговременных имплантатов. В настоящее время множество исследований было направлено на оптимизацию механических свойств сплавов системы Co-Cr-Mo, предназначенных для изготовления эндопротезов в целом или их металлических частей, путем изменения составов сплавов, технологии изготовления изделий и финишной обработки полученных эндопротезов, включая, прежде всего, их термообработку [7].

Существует несколько способов изготовления эндопротезов из сплавов системы Co-Cr-Mo, применяемых наиболее часто. К ним относятся: изготовление эндопротезов литьем (задействованы, как правило, специальные виды литья), получение изделий методами обработки давлением, применение процессов аддитивного производства (SLM-технологии, или селективная лазерная наплавка), а также их комбинации (например, литье с последующей деформацией и термообработкой). Каждый из методов используется в равной степени, при этом исследования, направленные на улучшение технологий, активно ведутся разными исследователями.

Следует отметить, что изготовление эндопротезов из сплавов на основе Co-Cr методом литья (в классическом его виде) считается не самым лучшим вариантом изготовления эндопротезов. Это обусловлено тем, что при затвердевании литых заготовок могут образоваться крупнокристаллические дендритные зерна, наличие которых снижает предел текучести сплава и способствует возникновению дефектов (таких как включения и микропоры), которые повышают внутренние напряжения [8]. Одним из вариантов решения этой проблемы является применение специальных видов литья с использованием вакуумно-индукционной плавки кобальтовых сплавов (рисунок 1) с последующей термообработкой полученных литых заготовок. В последние несколько десятилетий литейный сплав Co-Cr-Mo F75 широко используется в ортопедических имплантатах [8; 9].

В целом, для изготовления эндопротезов применяются сплавы на основе Co-Cr-Mo, которые могут содержать компоненты в следующем диапазоне, мас. %: Co – 53–69; Cr – 25–32; Mo – 2–11; C – 0,007–0,35; Si – 0,15–1,25; Mn – 0,15–1; N – 0,025–0,25; Fe – 0,025–1; W – 0,2–0,4; Ni – 0,1–2,5; Ti – 0,1–6; Al и В до 0,1; P и S до 0,15 и 0,01 соответственно [1–11].

Работы [10; 11] направлены на исследование влияния отжига и горячейковки на микроструктуру и механические свойства сплава Co-Cr-Mo с целью получения исходных данных для разработки нового процесса обработки давлением. Сплав Co-Cr-Mo был получен методом вакуумно-индукционной плавки. Слиток сплава Co-Cr-Mo сначала гомогенизировали при температуре 1250 °С в течение 5 ч. Часть гомогенизированного слитка подвергали выдержке при температуре 1200 °С в течение 1 ч с последующей горячейковкой в

виде стержневых образцов диаметром 30 мм. Стержневые образцы повторно нагревались при 1200 °С в течение 1 ч и подвергались горячей ковке в виде стержней диаметром 20 мм. Затем образцы отжигали при 1200 °С в течение 1 ч и охлаждали на воздухе. Другая часть гомогенизированного сплава после выдержки при 1200 °С в течение 1 ч была подвергнута горячей ковке в стержневые образцы диаметром 42 мм. Часть из них выдерживалась при температуре 1100 °С в течение 1 ч, после чего подвергалась горячей ковке до уменьшения площади соответственно на 40, 42, 47, 49 и 57 %.



Рисунок 1 – Печь для вакуумно-индукционной плавки

Для исследования влияния температуры нагрева на микроструктуру один из образцов стержней выдерживался при температуре 1000 °С в течение 1 ч и подвергался горячей ковке до уменьшения площади на 50 % при начальной температуре 1000 °С. Таким обра-

зом, были получены отожженные и горячекованные образцы сплава Co-Cr-Mo для проведения микроструктурных исследований и механических испытаний. Было выявлено, что на границе зерен отожженного Co-Cr-Mo сплава наблюдалось большое количество преципитатов, что объяснялось относительно высоким содержанием углерода. Кроме того, оптическая микроструктура горячекованного сплава Co-Cr-Mo имела более тонкую структуру, чем у отожженного сплава [10].

Литье, как метод изготовления эндопротезов из сплавов на основе системы Co-Cr-Mo, в коммерческих масштабах используется достаточно широко [12]. Одним из примеров является изготовление заготовок эндопротезов тазобедренных суставов методом вакуумно-индукционной плавки [13]. Отмечается, что литье требует более быстрого времени обработки, чем, например, изготовление биоимплантов с использованием методов обработки давлением. Результаты проведенных исследований показали, что и кованные, и литые эндопротезы из сплавов на основе кобальта обладают высокой коррозионной стойкостью и абразивной износостойкостью, что положительно сказывается на свойствах полученных коленных и тазобедренных суставов [14].

Работы [15; 16] направлены на исследование влияния термической обработки заготовки из сплава LPBF Co28Cr6Mo (полученной методом селективного плавления металлических порошков) на структуру и физико-механические свойства. Было установлено, что выдержка заготовки при 850 °C в течение 180 мин с последующим старением является наиболее оптимальным методом термообработки. В условиях испытаний, приближенных к эксплуатационным, сплав LPBF после термообработки показал износостойкость, более высокую, чем у обычного деформируемого сплава. Оптимизированная термообработка старением значительно модифицировала микроструктуру сплава LPBF, повысив его твердость и, в целом, положительно повлияла на его износостойкость.

Следует отметить, что литой сплав на основе Co-Cr-Mo, как правило, подвергается высокотемпературной обработке при 1200–1230 °C с закалкой в специальных растворах [16] или закалке в воде с последующим изотермическим старением при 850 °C [17].

В результате после проведения такой обработки твердость сплава составляет 512 ± 580 HV.

Исходя из вышесказанного, несмотря на активное внедрение технологий аддитивного производства, технология литья остается актуальным и востребованным направлением не только как один из основных методов изготовления машиностроительных деталей, но и изделий медицинского назначения. Правильно назначенные технологические маршруты получения, с использованием вакуумно-индукционной плавки, и термической обработки обеспечивают получение эндопротезов из сплавов на основе системы Co-Cr-Mo с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами изделий.

Список литературы

1. **Atkinson, J. R.** Materials for internal prostheses: the present position and possible future developments / J. R. Atkinson, J. M. Dowling, R. Z. Cicek // *Biomaterials*. – 1980. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 89–99.
2. **Devine, T. M.** Wrought cobalt-chromium surgical implant alloys / T. M. Devine, F. J. Kummer, J. Wulff // *Journal of Materials Science*. – 1972. – Vol. 7. – P. 126–128.
3. **Niinomi, M.** Recent metallic materials for biomedical applications / M. Niinomi, // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2002. – Vol. 33. – P. 477–486.
4. **Mani, A.** Deformation induced FCC to HCP transformation in a Co–27Cr–5Mo– 0.05C alloy / A. Mani, A. Salinas-Rodriguez, H. F. Lopez // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – Vol. 528, Iss. 7. – P. 3037–3043.
5. **Niinomi, N.** Fatigue characteristics of metallic biomaterials / N. Niinomi // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29. – P. 992–1000.
6. **Teoh, S. H.** Fatigue of biomaterials: a review / S. H. Teoh // *International Journal of Fatigue*. – 2000. – Vol. 22. – P. 825–837.
7. **Fatigue** improvement of electron beam meltingfabricated biomedical Co-Cr-Mo alloy by accessible heat treatment / D. Wei [et al.] // *Materials Research Letters*. – 2018. – Vol. 6, No 1. – P. 93–99.

8. Effect of molybdenum content on structural, mechanical, and tribological properties of hot isostatically pressed b-type titanium alloys for orthopedic applications / M. Fellah [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28, Iss. 10. – P. 5988–5999.

9. Nalbant, M. The effect of cutting speed v_c and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys / M. Nalbant, A. Altin, H. Gokkaya // *Materials & Design*. – 2007. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 1334–1338.

10. Okazaki, Y. Effects of Heat Treatment and Hot Forging on Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy for Surgical Implants / Y. Okazaki // *Materials Transactions*. – 2008. – Vol. 49, No 4. – P. 817–823.

11. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ni- and C-Free Co-Cr-Mo Alloys for Medical Applications / S.-H Lee [et al.] // *Materials Transactions*. – 2005. – Vol. 46, No 8. – P. 1790–1793.

12. Biomechanics of hip and knee prostheses / J. Alvarado [et al.] // *Appl Eng Mech Med*. – 2003. – P. 6–22.

13. Effects of carbon addition on wear mechanisms of CoCrMo metal-on-metal hip joint bearings / Y. Chen [et al.] // *Materials Science and Engineering C*. – 2017. – Vol. 76. – P. 997–1004.

14. Balagna, C. Tantalum-based multilayer coating on cobalt alloys in total hip and knee replacement / C. Balagna, M. Faga, S. Spriano // *Materials Science and Engineering C*. – 2012. – Vol. 32, Iss. 4. – P. 887–895.

15. Different Response of Cast and 3D-Printed Co-Cr-Mo Alloy to Heat Treatment: A Thorough Microstructure Characterization / M. Roudnicka [et al.] // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, Iss. 5. – P. 687.

16. Tonelli, L. A novel heat treatment of the additively manufactured Co28Cr6Mo biomedical alloy and its effects on hardness, microstructure and sliding wear behavior / L. Tonelli, M. M. Z. Ahmed, L. Ceschini // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 8. – P. 313–329.

17. Additive manufacturing of Co-Cr-Mo alloy: influence of heat treatment on microstructure, tribological, and electrochemical properties / K. M. Mantrala [at al.] // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 1. – P. 7.

References

- 1. Atkinson, J. R.** Materials for internal prostheses: the present position and possible future developments / J. R. Atkinson, J. M. Dowling, R. Z. Cicek // *Biomaterials*. – 1980. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 89–99.
- 2. Devine, T. M.** Wrought cobalt-chromium surgical implant alloys / T. M. Devine, F. J. Kummer, J. Wulff // *Journal of Materials Science*. – 1972. – Vol. 7. – P. 126–128.
- 3. Niinomi, M.** Recent metallic materials for biomedical applications / M. Niinomi, // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2002. – Vol. 33. – P. 477–486.
- 4. Mani, A.** Deformation induced FCC to HCP transformation in a Co–27Cr–5Mo– 0.05C alloy / A. Mani, A. Salinas-Rodriguez, H. F. Lopez // *Materials Science and Engineering A*. – 2011. – Vol. 528, Iss. 7. – P. 3037–3043.
- 5. Niinomi, N.** Fatigue characteristics of metallic biomaterials / N. Niinomi // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29. – P. 992–1000.
- 6. Teoh, S. H.** Fatigue of biomaterials: a review / S. H. Teoh // *International Journal of Fatigue*. – 2000. – Vol. 22. – P. 825–837.
- 7. Fatigue** improvement of electron beam melting fabricated biomedical Co-Cr-Mo alloy by accessible heat treatment / D. Wei [et al.] // *Materials Research Letters*. – 2018. – Vol. 6, No 1. – P. 93–99.
- 8. Effect of** molybdenum content on structural, mechanical, and tribological properties of hot isostatically pressed b-type titanium alloys for orthopedic applications / M. Fellah [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2019. – Vol. 28, Iss. 10. – P. 5988–5999.
- 9. Nalbant, M.** The effect of cutting speed v_c and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys / M. Nalbant, A. Altin, H. Gokkaya // *Materials & Design*. – 2007. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 1334–1338.
- 10. Okazaki, Y.** Effects of Heat Treatment and Hot Forging on Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy for Surgical Implants / Y. Okazaki // *Materials Transactions*. – 2008. – Vol. 49, No 4. – P. 817–823.
- 11. Effect** of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ni- and C-Free Co-Cr-Mo Alloys for Medical Applications /

S.-H Lee [et al.] // Materials Transactions. – 2005. – Vol. 46, No 8. – P. 1790–1793.

12. Biomechanics of hip and knee prostheses / J. Alvarado [et al.] // Appl Eng Mech Med. – 2003. – P. 6–22.

13. Effects of carbon addition on wear mechanisms of CoCrMo metal-on-metal hip joint bearings / Y. Chen [et al.] // Materials Science and Engineering C. – 2017. – Vol. 76. – P. 997–1004.

14. Balagna, C. Tantalum-based multilayer coating on cobalt alloys in total hip and knee replacement / C. Balagna, M. Faga, S. Spriano // Materials Science and Engineering C. – 2012. – Vol. 32, Iss. 4. – P. 887–895.

15. Different Response of Cast and 3D-Printed Co-Cr-Mo Alloy to Heat Treatment: A Thorough Microstructure Characterization / M. Roudnicka [et al.] // Metals. – 2021. – Vol. 11, Iss. 5. – P. 687.

16. Tonelli, L. A novel heat treatment of the additively manufactured Co28Cr6Mo biomedical alloy and its effects on hardness, microstructure and sliding wear behavior / L. Tonelli, M. M. Z. Ahmed, L. Ceschini // Progress in Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 8. – P. 313–329.

17. Additive manufacturing of Co-Cr-Mo alloy: influence of heat treatment on microstructure, tribological, and electrochemical properties / K. M. Mantrala [at al.] // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 1. – P. 7.

Поступила 18.10.2023

Received 18.10.2023