

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791.763.1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.009

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ПРИ СИНТЕЗЕ СПЛАВОВ Ti–Au

Сергей Эдуардович Буцыкин^{1†}, Василий Александрович Клименов²,
Ирина Леонидовна Стрелкова³, Максим Александрович Елкин⁴,
Дарья Дмитриевна Семейкина⁵, Михаил Степанович Слободян⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

^{1, 4} Научно-производственный центр «Полюс», пр. Кирова, 56в, 634050, Томск, Россия

⁶ Томский научный центр СО РАН, пр. Академический, 10/4, 634055, Томск, Россия

¹ butsykin.s.e@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0001-5475-2601>

² klimenov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>

³ strelkova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>

⁴ cricket.fir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1220-5762>

⁵ dds15@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5068-3757>

⁶ s.m.s@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5718-7027>

Аннотация. Сплавы титана с золотом рассматриваются как перспективные для применения в стоматологии за счет их высокой твердости и биоинертности, однако данные по влиянию их состава и методов изготовления на функциональные свойства довольно ограничены в настоящее время. С целью восполнения этого пробела, в данной работе были синтезированы шесть сплавов Ti–Au путем сплавления двух титановых пластин и тонкой золотой фольги между ними пропусканием униполярных импульсов электрического тока (процесс аналогичный контактной точечной сварке). Импульсы отличались длительностью заднего фронта на завершающем этапе процесса, так как основная цель заключалась в исследовании влияния скорости охлаждения металла на микроструктуру и механические свойства формируемых сплавов. Микроструктура была исследована методом оптической микроскопии, распределение микротвердости определяли наноиндентированием модифицированной пирамидой Берковича, распределение химических элементов было определено с помощью растрового электронного микроскопа, оборудованного энергодисперсионным спектрометром с последующей статистической обработкой полученных данных. Наиболее равномерное распределение золота и максимальная средняя микротвердость металла литого ядра, а также высокая прямая корреляция между этими параметрами были достигнуты при имплементации режима с наибольшей длительностью охлаждения. Во всех исследованных случаях была обнаружена неравновесная литая микроструктура, состоящая из двух фаз: твердого раствора α -Ti(Au) и интерметаллидов AuTi₃, причем участки интерметаллидных включений, обладающие повышенной микротвердостью, были распределены по объему достаточно равномерно. На основании полученных результатов был сделан вывод, что представленная методика формирования и исследования сплавов является эффективным методом, позволяющим изучать металлургические процессы, протекающих в условиях высокоэнергетических воздействий, а также в лабораторных условиях разрабатывать наиболее рациональные термические циклы для их последующего внедрения в реальных промышленных технологиях.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, сплав Ti–Au, униполярные импульсы тока, тепловложение, скорость охлаждения, микроструктура, микротвердость.

Благодарности: В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Для цитирования: Буцыкин С.Э., Клименов В.А., Стрелкова И.Л., Елкин М.А., Семейкина Д.Д., Слободян М.С. Управление скоростью кристаллизации в условиях контактной точечной сварки при синтезе сплава Ti–Au // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 4. С. 501–508. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.04.009.

Original article

CONTROL OF THE SOLIDIFICATION RATE IN THE SYNTHESIS OF Ti–Au ALLOYS UNDER RESISTANCE SPOT WELDING CONDITIONS**Sergey E. Butsykin^{1†}, Vasily A. Klimenov², Irina L. Strelkova³, Maxim A. Elkin⁴, Daria D. Semeykina⁵, Michail S. Slobodyan⁶**^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk Polytechnic University, Lenina Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia^{1, 4} Scientific & Industrial Centre «Polyus», Kirova Pr., 56v, Tomsk, 634050, Russia⁶ Tomsk Scientific Center SB RAS, Academical Pr., 10/4, Tomsk, 634055, Russia¹ butsykin.s.e@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0001-5475-2601>² klimenov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7583-0170>³ strelkova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2222-2865>⁴ cricket.fir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1220-5762>⁵ dds15@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5068-3757>⁶ s.m.s@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5718-7027>

Abstract. Titanium-gold alloys are considered to be promising in dentistry due to their high hardness and bio-inertness. However, data on the effect of their compositions and manufacturing methods on functional properties are rather limited nowadays. In order to fill this knowledge gap, six Ti–Au alloys were synthesized by fusing two titanium plates and a thin gold foil between them by electric current flowing (a process similar to resistance spot welding) with unipolar pulses. The pulses differed in the down slope duration, since the research goal was to study the influence of the metal cooling rate on the microstructure and mechanical properties of the formed alloys. The microstructure was examined by optical microscopy, microhardness distributions were determined by nanoindentation and variations of chemical composition through the nugget volumes were assessed by EDS analysis. The most even gold distribution and the maximum average microhardness in the Ti–Au nugget, as well as a high direct correlation between these parameters, were observed after the implementation of the longest cooling duration. In all studied cases, uneven cast microstructures were found, consisting of two phases: the α -Ti(Au) solid precipitates and the AuTi₃ intermetallic compounds. Such intermetallic inclusions, exhibiting increased microhardness, were distributed fairly evenly throughout the nugget volume. Based on the obtained results, it was concluded that the reported technique for the formation and study of alloys is rather effective. It enables to investigate high-rate metallurgical processes and find the most appropriate thermal cycles in laboratory conditions for their subsequent implementation in various industrial procedures.

Keywords: resistance spot welding, Ti–Au alloy, unipolar current pulses, heat input, cooling rate, microstructure, microhardness.

Acknowledgements: The research was carried out using equipment of the CSU NMNT TPU, supported by the RF MES project No. 075-15-2021-710.

For citation: Butsykin, S. E., Klimenov, V. A., Strelkova, I. L., Elkin, M. A., Semeykina, D. D. & Slobodyan, M. S. (2022). Control of the solidification rate in the synthesis of Ti–Au alloys under resistance spot welding conditions. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 4(19), 501–508. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.009.

Введение

Один из возможных способов повышения функциональных свойств титана – легирование золотом [1]. Сплавы Ti–Au обладают повышенной коррозионной стойкостью [2, 3] и твердостью [3, 4], их применение позволит значительно повысить эксплуатационные характеристики изделий. Высокая биосовместимость обоих металлов также обуславливает их применяемость в медицинской отрасли [1].

Попытки синтезировать сплав титана с золотом были предприняты в ряде исследований

[2–6] с помощью плавления в тиглях индукционным или дуговым способом нагрева в атмосфере инертных газов. Однако особенностью формирования сплава системы Ti–Au является существенное влияние параметров технологии изготовления на его свойства [5] и зависимость микроструктуры и фазового состава от химического состава и термического цикла [4]. Более того, термические циклы имеют большее влияние на размер зерен, чем соотношение титана и золота [1].

Контролировать термические циклы нагрева и охлаждения объема металла литого ядра

возможно с помощью контактной точечной сварки (КТС), при которой тепло выделяется в соответствии с законом Джоуля-Ленца [7] и напрямую зависит от величины пропускаемого электрического тока. Впервые синтезированный сплав Ti–Au с помощью КТС был исследован в работе Клименова с соавторами [8]. Однако в полученном сплаве распределение золота по сечению литого ядра было недостаточно равномерным, а максимальные и минимальные значения приходились на периферию литого ядра, что связано с довольно короткой длительностью импульса тока, малой тепловой инерцией тонких деталей и высокой скоростью охлаждения [9, 10]. При этом золото не успевало полностью смешаться с расплавленным титаном вследствие гидродинамических процессов. В ряде работ показано, что подтверждением синтеза и образования соединений золота с титаном в условиях КТС могут служить повышенные значения твердости [8], зависящие от типа образующегося соединения [4-6].

Уменьшение скорости охлаждения при формировании сплава должно существенно увеличить время пребывания металла в жидком состоянии и обеспечить равномерное распределение золота по всему объему литого ядра, а также привести к снижению остаточных напряжений [11] и уменьшить вероятность образования внутренних дефектов [7]. Управлять скоростью охлаждения в процессе КТС стало возможно с помощью современных источников

питания, позволяющих задавать любую форму импульса тока [12, 13].

Соответственно, цель настоящей работы – установление влияния различной скорости охлаждения на микроструктуру, микротвердость и распределение элементов сплава Ti–Au, полученного с помощью КТС.

Материалы и методы

Для синтеза сплавов Ti–Au использовали специальную сварочную установку, включающая в себя источник питания ИПТКМ-10 и модернизированный механизм сжатия от контактной машины МТТ-02. Источник питания представляет собой цифровой синтезатор униполярных импульсов тока с требуемыми алгоритмами независимо от сопротивления нагрузки. Между двумя пластинами из технического титана ВТ1-0 толщиной 0,3 мм укладывалась золотая фольга (99,99 %) толщиной 50 мкм (рис.1а). Непосредственно перед исследованиями образцы тщательно обезжировали этиловым спиртом (C₂H₅OH). Собранный пакет помещался между электродами из сплава БрХЦР диаметром 4 мм и радиусом рабочей поверхности 15 мм. Затем прикладывали усилие 300 Н и пропускали сварочный ток. Сплавы синтезировали в шести режимах (рис.1б), отличающихся длительностью спада основного сварочного импульса тока.

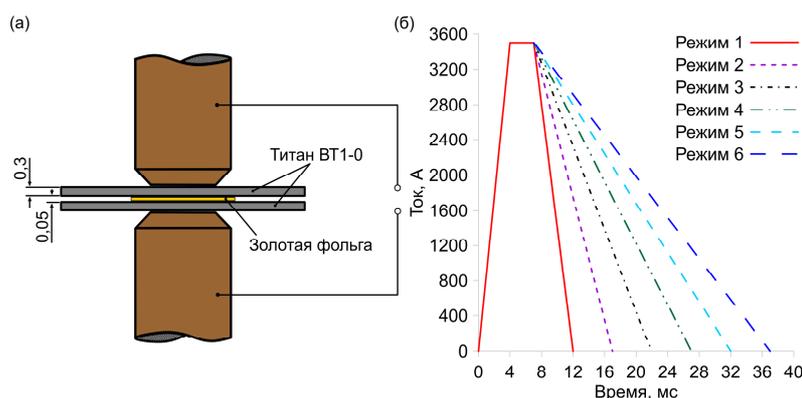


Рис.1. Условия проведения исследования: (а) – схема синтеза сплавов Ti–Au; (б) – амплитудно-временные параметры импульсов тока

Fig.1. Research conditions: (a) – a scheme of the synthesis of Ti–Au alloys; (b) – current pulse profiles

Для проведения металлографических исследований литые ядра образцов были разрезаны поперек. Затем поверхность поперечного сечения шлифовали и полировали шлифоваль-

ными шкурками и алмазными пастами, а также очищали ацетоном с помощью ультразвукового очистителя. Для выявления микроструктуры сплава применяли два травителя: смесь 70 %

HCl и 30 % HNO₃ для золота; смесь 50 % HF и 50 % C₃H₈O₃ для титана. Распределение микротвердости определяли наноиндентированием модифицированной пирамидой Берковича при постоянной силе 250 мН с помощью установки Nano Indenter G200 в соответствии со стандартом ISO 14577 согласно схеме (рис.5). Для расчета средних значений измеряли микротвердость по Виккерсу с нагрузкой 100 г.

Также исследовали распределение химических элементов с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D, оборудованного энергодисперсионным спектрометром. Микроструктуру рассматривали на оптическом микроскопе Axio Observer.A1m.

Данные о распределении химических элементов и значениях микротвердости были статистически обработаны с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

После формирования сплавов в режимах 2, 4 и 5 был обнаружен выплеск части металла литых ядер (рис.2) вследствие неточного расположения фольги под электродами (в связи с ее малыми размерами), что привело к уменьшению площади фактического контакта металлических поверхностей, повышению кон-

тактного сопротивления и, соответственно, большему тепловложению [10].

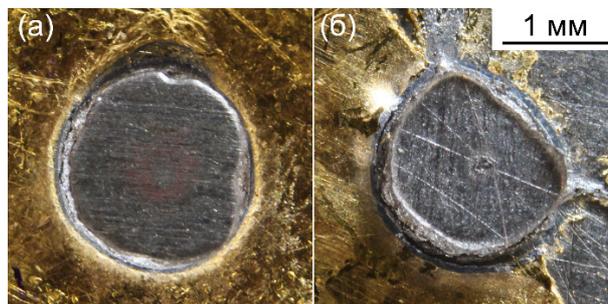


Рис.2. Общий вид сформированных литых ядер сплавов Ti-Au после отрыва титановой пластины: (а) – режимы 1, 3, 6; (б) – режимы 2, 4, 5

Fig.2. General views of the Ti-Au nuggets: (a) – modes 1, 3, 6; (b) – modes 2, 4, 5

В синтезированных сплавах отсутствовали неоднородности, такие как несплавление, трещины, поры и т. п. (рис.3). Поскольку в литых ядрах не было обнаружено трещин или усадочных пустот, характерных при КТС некоторых металлов, сталей и сплавов, можно утверждать, что синтезированный сплав Ti-Au очень пластичен при исследованных скоростях охлаждения.



Рис.3. Макроструктура литого ядра (режим 3)

Fig.3. The nugget macrostructure (mode 3)

В литом ядре (рис.4) сформировалась неравновесная структура, состоящая из двух фаз: твердого раствора α -Ti(Au) и интерметаллидов AuTi₃. При рассмотрении травленной поверхности шлифа участки интерметаллидных включений немного возвышаются на поверхности, что подтверждает их повышенную твердость. Формирование чередующихся слоев сплавления можно объяснить разной концентрацией

сплавляемых элементов и недостаточной температурой в литом ядре. В слое с низким содержанием Au (темный слой) сформировалась литая структура видманштеттового типа, состоящая из твердого раствора α -Ti(Au). В слое, пересыщенном атомами Au, структура более однородна и состоит из ламелей игольчатого вида разной кристаллографической ориентации.

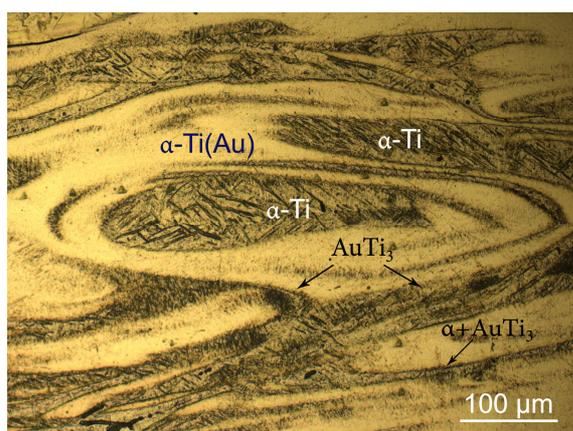


Рис.4. Микроструктура литого ядра (режим 3)

Fig.4. The nugget microstructure (mode 3)

Можно предположить, что интенсивность диффузионных процессов в интерметаллидных фазах несколько выше, так как ширина светлых слоев больше. Кроме того, установлено, что преимущественное расположение включений интерметаллидов $AuTi_3$ находится на границах зон сплавления с разной концентрацией Au. Они сформировались в процессе диффузионного взаимодействия двух слоев в твердой фазе с

образованием характерной зоны, состоящей из тонких прослоек $\alpha-Ti(Au)$ и $AuTi_3$ пластинчатого вида. Отсутствие выраженной белой сетки интерметаллидной фазы $AuTi_3$ по границам зерен $\alpha-Ti(Au)$ дает возможность предположить, что сформирована доэвтектидная структура пересыщенного $\alpha-Ti(Au)$ и $AuTi_3$ с содержанием Au до 20% в соответствии с диаграммой фазового состояния Ti–Au [1].

Значения микротвердости, полученные наоиндентированием по осям X и Y согласно схеме, показанной на рис.5, в целом соответствовали распределениям значений по Виккерсу (рис.6). На некоторых кривых показаны доверительные интервалы, в остальных режимах их уровень сопоставим. Наименьшие значения твердости наблюдались в сплавах, полученных в режимах 2, 4 и 5. Выплеск жидкого металла из зоны сплавления привел к неравновесному формированию литых ядер и дискретному распределению золота по всему объему, что подтверждается значительным разбросом данных микротвердости по оси X относительно других режимов.

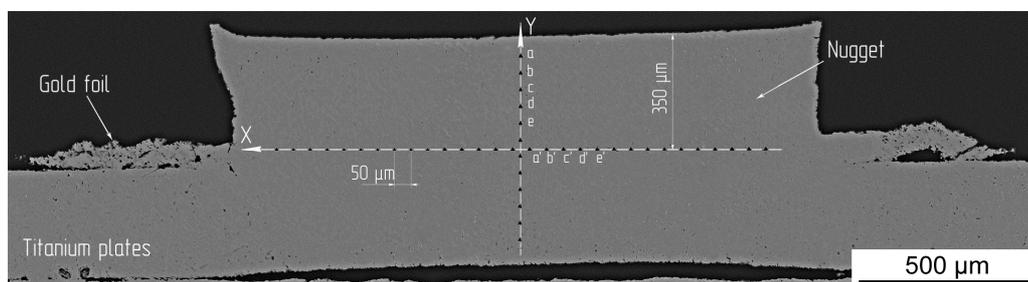


Рис.5. Схема наоиндентирования и энергодисперсионного анализа

Fig.5. A scheme of the nanoindentation tests and energy dispersive analysis

Наибольшее среднее значение микротвердости (около 5 ГПа) в зоне сплавления соответствует режиму 6, причем разброс данных был минимальным и в сравнении с режимом 1 снизился в 1,8 раза. Плавный спад импульса тока обусловил снижение скорости охлаждения литого ядра, а также увеличил время пребывания металла в жидком состоянии, в связи с чем, вследствие гидродинамических процессов, золото успело равномерно смешаться с расплавленным титаном по всему объему. Это предположение подтвердилось результатами распределения химических элементов, полученными с помощью энергодисперсионного анализа.

Результаты статистической обработки данных микротвердости и содержания золота в

сплаве (рис.7) позволили определить коэффициент корреляции значений по всей выборке, который составил 0,8. Это свидетельствует о достаточно высокой прямой зависимости уровня твердости сплавов Ti–Au от содержания в них золота.

На рис.8 представлены средние значения содержания золота в синтезированных сплавах. Наименьшая атомная (и молярная) масса золота в объеме металла литого ядра соответствует режимам 4 и 5, что объясняется выплеском жидкого металла во время его синтеза. Высокая степень дисперсии золота в режиме 2 связана с тем же явлением.

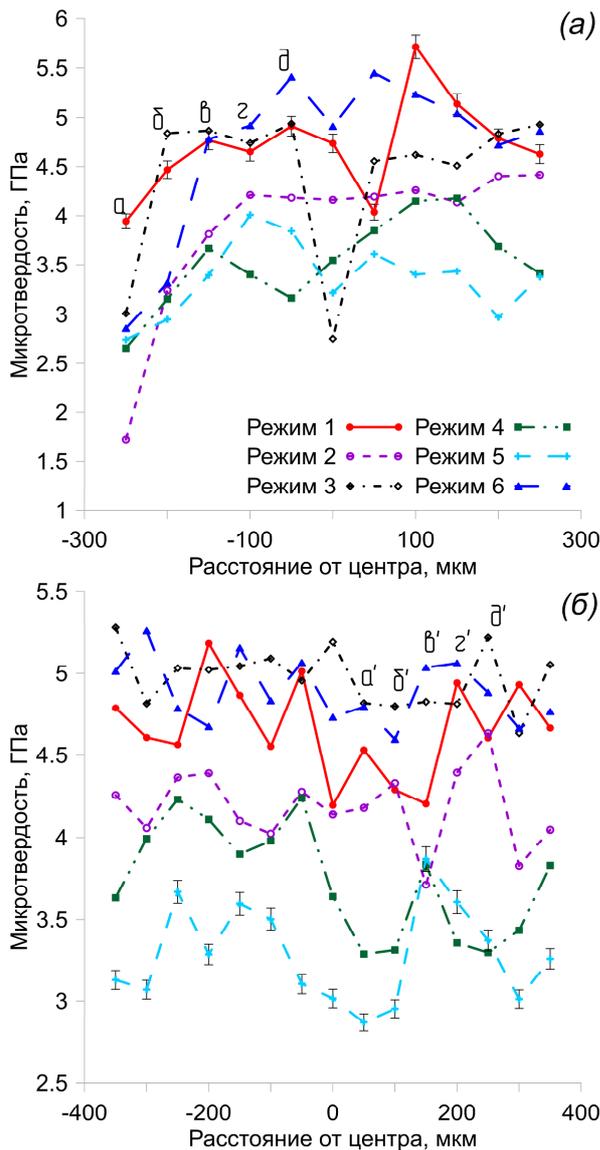


Рис.6. Распределение микротвердости по оси Y (а) и X (б)

Fig.6. Distributions of the microhardness values along the Y (a) and X (b) axes

Исходя из высоты литого ядра (около 500 мкм), с учетом полностью переплавленной золотой фольги толщиной 50 мкм следует, что минимальная атомная масса золота в сплаве должна быть около 10 %. В сплаве, сформированном в режиме 1, она в среднем составляет 10 % (рис.8), однако варьируется в пределах 8,5...11,5 %. В то же время дисперсия значений снизилась в 2,5 раза в режиме 6, а средний уровень уменьшился незначительно, что подтверждается распределением микротвердости и указывает на положительный эффект снижения скорости охлаждения при синтезе сплавов с помощью КТС.

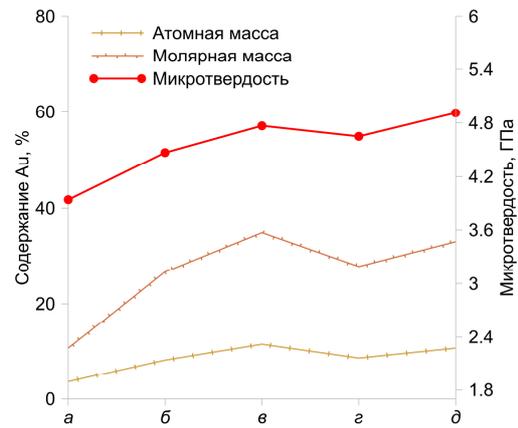


Рис.7. Значения микротвердости и содержания золота

Fig.7. The microhardness and gold content values

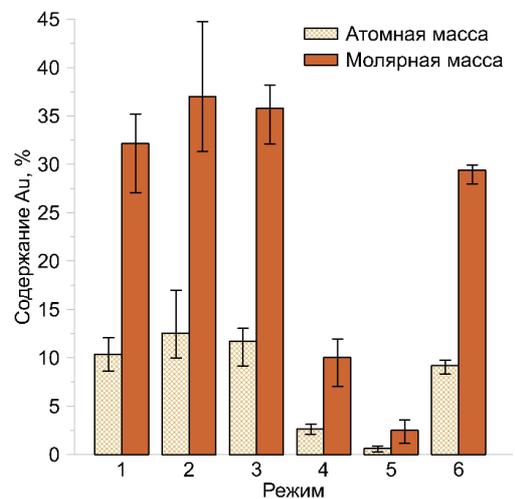


Рис.8. Среднее содержание золота в сплавах Ti-Au

Fig.8. The average gold contents in the Ti-Au alloys

Высота литого ядра во всех случаях составляла около 80-90 % от общей толщины соединяемых пластин (рис.3), что характерно при КТС титановых сплавов из-за их высокого удельного сопротивления [14].

Наконец, можно констатировать, что КТС может быть использована в качестве основы для дальнейшего развития методов исследования возможности управления микроструктурами и свойствами других синтезированных модельных сплавов с помощью заданных термических циклов и реализована во многих отраслях промышленности. Это позволит более обоснованно разрабатывать промышленные технологии их термической обработки. Химический состав синтезированных сплавов можно варьировать в широких пределах, изменяя отношение толщин металлических пластин. Кроме того, рассмотренная методика позволяет

синтезировать многокомпонентные сплавы путем сплавления пластин различного химического состава.

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Скорость охлаждения при синтезе сплава Ti–Au оказывает влияние как на микротвердость, так и на распределение химических элементов в сплаве. В режиме с наибольшей длительностью снижения тока на завершающем этапе процесса достигнута равномерное распределение золота и максимальная средняя микротвердость литого ядра, а также высокая прямая корреляция между этими параметрами.

2. В сплаве Ti–Au, полученном КТС, формируется неравновесная литая структура, состоящая из двух фаз: твердого раствора α -Ti(Au) и интерметаллидов AuTi₃, причем участки интерметаллидных включений обладают повышенной микротвердостью и достаточно распределены по объему.

3. Представленная методика легирования металлов и сплавов в условиях КТС путем управления скоростью охлаждения имеет значение как для развития самой контактной сварки, так и для изучения металлургических процессов, протекающих в условиях высокоэнергетических воздействий.

Список литературы

1. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Weinheim: John Wiley, 2003. 532 p.
2. Takahashi M., Kikuchi M., Takada Y., Okuno O., Okabe T. Corrosion behavior and microstructures of experimental Ti–Au alloys // Dental materials journal. 2004. V. 23, N 2. P. 109–116.
3. Lee Y.R., Han M.K., Kim M.K., Moon W.J., Song H.J., Park Y.J. Effect of gold addition on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti alloys // Gold Bulletin. 2014. V. 47, N 3. P. 153–160.
4. Xin Y., Han K., Svanidze E., Besara T., Siegrist T., Morosan E. Microstructure of hard biocompatible Ti_{1-x}Au_x alloys // Materials Characterization. 2019. V. 149. P. 133–142.
5. Svanidze E., Besara T., Ozaydin M.F., Tiwary C.S., Wang, J.K. et al. High hardness in the biocompatible intermetallic compound β -Ti₃Au // Science advances. 2016. V. 12, N 7. P. e1600319.

6. Zadorozhnyy V.Y., Kozak D.S., Shi X., Wada T., Louzguine-Luzgin D.V., Kato H. Mechanical properties, electrochemical behavior and biocompatibility of the Ti-based low-alloys containing a minor fraction of noble metals // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 732. P. 915–921.

7. Орлов Б.Д., Чакалев А.А., Дмитриев Ю.В. Технология и оборудование контактной сварки. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

8. Klimenov V., Slobodyan M., Ivanov Y., Kiselev A., Matrenin S. Metallurgy of a Ti–Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion // Intermetallics. 2020. V. 127. P. 106968.

9. Соколов Н.М. Микросварка в массовом производстве радиоламп. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1971. 176 с.

10. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. Киев: Наук. думка, 1985. 272 с.

11. Chabok A., Van Der Aa E., Basu I., De Hosson J., Pei Y. Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel // Science and Technology of Welding and Joining. 2018. V. 23, N 8. P. 649–658.

12. Gnyusov S.F., Kiselev A.S., Slobodyan M.S., Sovetchenko B.F. Formation of a joint in resistance spot microwelding // Welding International. 2005. V. 19, N 9. P. 737–741.

13. Akbolatov E.Z., Kiselev A.S., Slobodyan M.S. Prediction and stabilization of initial resistance between electrodes for small-scale resistance spot welding // Welding in the World. 2019. V. 63, N 2. P. 443–457.

14. Klimenov V.A., Kurgan K.A., Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Gnyusov S.F. Structure of Ti–6Al–4V nanostructured titanium alloy joint obtained by resistance spot welding // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1698, N 1. P. 030007.

Информация об авторах

С. Э. Буцыкин – инженер научно-производственного центра «Полус», аспирант Томского политехнического университета.

В. А. Клименов – доктор технических наук, руководитель отделения Томского политехнического университета.

И. Л. Стрелкова – кандидат технических наук, доцент Томского политехнического университета.

М. А. Елкин – инженер научно-производственного центра «Полюс», аспирант Томского политехнического университета.

Д. Д. Семейкина – магистрант Томского политехнического университета

М. С. Слободян – кандидат технических наук, научный сотрудник Томского научного центра СО РАН.

References

- Leyens, C. & Peters, M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Weinheim: John Wiley, 2003. P. 532.
- Takahashi, M., Kikuchi, M., Takada, Y., Okuno, O. & Okabe, T. (2004). Corrosion behavior and microstructures of experimental Ti-Au alloys. *Dental materials journal*, 23(2), 109–116.
- Lee, Y. R., Han, M. K., Kim, M. K., Moon, W. J., Song, H. J. & Park, Y. J. (2014). Effect of gold addition on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ti alloys. *Gold Bulletin*, 47(3), 153–160.
- Xin, Y., Han, K., Svanidze, E., Besara, T., Siegrist, T. & Morosan, E. (2019). Microstructure of hard biocompatible Ti_{1-x}Au_x alloys. *Materials Characterization*, 149, 133–142.
- Svanidze, E., Besara, T., Ozaydin, M. F., Tiwary, C. S. & Wang, J. K. et al. (2016). High hardness in the biocompatible intermetallic compound β-Ti₃Au. *Science advances*, 2(7), e1600319.
- Zadorozhnyy, V. Y., Kozak, D. S., Shi, X., Wada, T., Louzguine-Luzgin, D. V. & Kato, H. (2018). Mechanical properties, electrochemical behavior and biocompatibility of the Ti-based low-alloys containing a minor fraction of noble metals. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 915–921.
- Orlov, B. D., Chakalev, A. A. & Dmitriev, U. V. (1986). Technology and equipment resistance welding. Moscow: Engineering. P. 352. (In Russ.).
- Klimenov, V., Slobodyan, M., Ivanov, Y., Kiselev, A. & Matrenin, S. (2020). Metallurgy of a Ti–Au alloy synthesized by controlled electric resistance fusion. *Intermetallics*, 127, 106968.
- Sokolov, N. M. (1971). Microwelding in Mass Production of Radio Valves. Saratov: Publishing house Privolzhsky. P. 176. (In Russ.).
- Moravskiy, V. E. & Vorona D. S. (1985). Technology and Equipment for Spot and Projection Condenser Welding. Kiev: Naukova Dumka. P. 272. (In Russ.).
- Chabok, A., Van Der Aa, E., Basu, I., De Hosson, J. & Pei, Y. (2018). Effect of pulse scheme on the microstructural evolution, residual stress state and mechanical performance of resistance spot welded DP1000-GI steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(8), 649–658.
- Gnyusov, S. F., Kiselev, A. S., Slobodyan, M. S. & Sovetchenko, B. F. (2005). Formation of a joint in resistance spot microwelding. *Welding International*, 19(9), 737–741.
- Akbolatov, E. Z., Kiselev, A. S. & Slobodyan, M. S. (2019). Prediction and stabilization of initial resistance between electrodes for small-scale resistance spot welding. *Welding in the World*, 63(2), 443–457.
- Klimenov, V. A., Kurgan, K. A., Chumaevskii, A. V., Klopotov, A. A. & Gnyusov, S. F. (2016). Structure of Ti-6Al-4V nanostructured titanium alloy joint obtained by resistance spot welding. *AIP Conference Proceedings*, 1698(1), 030007.

Information about the authors

S. E. Butsykin – Engineer of Scientific & Industrial Centre «Polyus», Graduate Student of Tomsk Polytechnic University.

V. A. Klimenov – Doctor of Technical Sciences, Director of Department, Tomsk Polytechnic University.

I. L. Strelkova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk Polytechnic University.

M. A. Elkin – Engineer of Scientific & Industrial Centre «Polyus», Graduate Student of Tomsk Polytechnic University.

D. D. Semeykina – Undergraduate of Tomsk Polytechnic University.

M. S. Slobodyan – Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, Tomsk Scientific Center SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 03.10.2022; принята к публикации 26.10.2022.

The article was received by the editorial board on 31 Aug. 22; approved after reviewing 03 Oct. 22; accepted for publication 26 Oct. 22.