

Received: 02.08.2022

Revised: 24.11.2022

Accepted: 23.12.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.006-015

EFFECT OF CRYODEFORMATION BY HIGH-PRESSURE TORSION ON THE FRACTURE SURFACE OF Au-Co ALLOYS

T. P. Tolmachev^{1, 2, a), *}, V. P. Pilyugin^{2, 3, b)}, N. V. Nikolayeva², A. I. Ancharov^{4, 5, c)},
A. M. Patselov^{2, d)}, Yu. V. Solov'eva^{6, e)}, T. I. Chashchukhina^{2, f)}, L. M. Voronova^{2, g)},
and M. V. Degtyarev^{2, h)}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*


²*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., 620108, Ekaterinburg, Russia*

³*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

⁴*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 Kutateladze St., Novosibirsk, 630128, Russia*

⁵*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
11 Ak. Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia*

⁶*Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering,
2 Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-9073-4507>  tolmachev@imp.uran.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0002-5150-6605>  pilyugin@imp.uran.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0003-2258-437X>  ancharov@mail.ru;
d)  <https://orcid.org/0000-0001-6438-0725>  patselov@imp.uran.ru;
e)  <https://orcid.org/0000-0003-2362-0555>  j_sol@mail.ru;
f)  <https://orcid.org/0000-0002-7056-6937>  highpress@imp.uran.ru;
g)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  highpress@imp.uran.ru;
h)  <https://orcid.org/0000-0001-8482-4928>  degtyarev@imp.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: tolmachev@imp.uran.ru

Address for correspondence: IMP UB RAS, 18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620990, Russian
Tel: +7 (343) 378 3805; fax: +7 (343) 374 5244

Au-Co alloys with limited solubility were synthesized by the high-pressure torsion in boiling nitrogen at various anvil revolutions. Au and Co were initially in the state of a powder mixture in an equiatomic ratio. The obtained alloys were subjected to SEM fractography and XRD analysis in transmission X-ray synchrotron radiation, depending on the amount of strain. It is shown that the morphology of the fracture surfaces of the synthesized alloy depends significantly on strain. It is revealed that the mutual mixing of the components increases with strain. The images of the fracture surfaces of the Au-Co alloys testify that, as the strain and the number of anvil revolutions increase, a transition from ductile fracture, with inclusions of brittle intergranular fracture, to uniformly ductile fracture is observed over the entire thickness of the sample. A further increase in the strain and the number of anvil revolutions corresponds to the transition from the ductile type of the fracture surface to the brittle one. In addition, the fractography of the Au-Co alloys has revealed that the relief of the fracture surface becomes more homogeneous and that the size of the structural elements of the fracture surface decreases with increasing strain.

Keywords: Au-Co alloys, mechanical alloying, high-pressure torsion, fracture.

Acknowledgment

The materials were produced and processed at the IMP UB RAS, Ekaterinburg. The electron microscopic investigations were performed by means of the equipment of the Testing Center of Nanotechnology and Advanced Materials shared research facilities of the IMP UB RAS, Ekaterinburg. The X-ray synchrotron measurements were made with the Hard X-Ray Diffractometry experimental station of the Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center shared research facilities, BINP SB RAS, Novosibirsk.

The research was performed partially under the state assignment from the Russian Ministry of Education and Science (theme Pressure, No. 122021000032-5), and it was financially supported by the RFBR, project No. 19-32-60039.

References

1. Miedema A.R., De Chatel P.F., De Boer F.R. Cohesion in alloys – fundamentals of a semi-empirical model. *Physica B*, 1980, vol. 100, pp. 1–28. DOI: 10.1016/0378-4363(80)90054-6.
2. Okamoto H., Massalski T.B., Hasebe M., Nishizawa T. The Au-Co (Gold-Cobalt) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1985, vol. 6, pp. 449–454. DOI: 10.1007/BF02869509.
3. Barabash O.M. and Koval' Yu.N. *Struktura i svoystva metallov i splavov: Spravochnik* [The Structure and Properties of Metals and Alloys: Handbook]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986. (In Russian).
4. *Svoystva elementov: spravochnik* [Properties of Elements: A Handbook, ed. by M.E. Drits]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985]. (In Russian).
5. Bernardi J., Hutten A., Thomas G. GMR behavior of nanostructured heterogeneous M-Co (M=Cu, Ag, Au) alloys. *Nanostructured Materials*, 1996, vol. 7, Nos. 1/2, pp. 205–220. DOI: 10.1016/0965-9773(95)00310-X.
6. Park J., Bae S.H., Son I. Improved contact resistance and solderability of electrodeposited Au-Sn alloy layer with high thermal stability for electronic contacts. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 551, pp. 149405. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149405.
7. Fredriksson H., Sunnerkrantz P.A., Victorin L. A binary dental gold-cobalt alloy of eutectic composition. *Acta Odontologica Scandinavica*, 1983, vol. 41, iss. 3, pp. 135–141. DOI: 10.3109/00016358309162314.
8. Zhou Y., Wang X., Huang X., Deng H., Hu Y. Construction of a gold-cobalt alloy catalyst to enhance the green reduction of carbon dioxide. *Journal of CO₂ Utilization*. 2022, vol. 65, pp. 102245. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102245.
9. Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. *Plastic Deformation of Nanostructured Materials*. London, New York, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017, 334 p. DOI: 10.1201/9781315111964.
10. Harsha R.N., Mithun Kulkarni V., Satish Babu B. Severe Plastic Deformation – A Review. In: *Materials Today: proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 10, part 3, pp. 22340–22349. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.600.
11. Degtyarev M.V. Multistage nature of the structure evolution in iron and structural steels upon shear under pressure. *The Physics of Metals and Metallography*, 2005, vol. 99, No. 6, pp. 595–608.
12. Tolmachev T.P., Pilyugin V.P., Ancharov A.I., Chernyshev E.G., Patselov A.M. The formation, structure, and properties of the Au–Co alloys produced by severe plastic deformation under pressure. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, pp. 135–142. DOI: 10.1134/S0031918X16020125.
13. Tolmachev T.P., Pilyugin V.P., Patselov A.M., Antonova O.V., Chernyshev E.G., Ancharov A.I., Degtyarev M.V. Stages of Mechanical Alloying in Systems with Different Solubility Cu–Zn and Au–Co in the Case of Cold and Low-Temperature Deformation by Torsion Under Pressure. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 61, pp. 942–948. DOI: 10.1007/s11182-018-1481-8.

14. B.A. Miller, R.J. Shipley, R.J. Parrington, D.P. Dennies, eds. Failure Analysis and Prevention: ASM Handbook, vol. 11, Materials Park, OH, ASM International, 2021, 856 p.
15. Nassef A.E., Alateyah A.I., El-Hadek M.A., El-Garaihy W.H. Mechanical behavior and fracture surface characterization of liquid-phase sintered Cu-Sn powder alloys. *Advanced Materials Letters*, 2017, vol. 8, iss. 6, pp. 717–722. DOI: 10.5185/amlett.2017.1485.
16. Korznikova G.F., Korznikova E.A., Khalikova G.R., Nazarov K.S., Khisamov R.Kh., Sergeev S.N., Shayakhmetov R.U., Mulyukov R.R. Al based layered in situ metal-matrix composites fabricated by constrained high pressure torsion. *Letters on Materials*, 2021, vol. 11 (4s), pp. 533–543. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-533-543.
17. Chernyshev E.G., Pilyugin V.P., Patselov A.M., Serikov V.V., Kleinerman N.M. Study of the phase composition and homogeneity of Fe-Cu alloys prepared by mechanoactivation under pressure. *The Physics of Metals and Metallography*, 2001, vol. 92, No. 2, pp. 179–184.
18. Ancharov A.I. The use of hard synchrotron radiation for diffraction studies of composite and functional materials. *Russian Physics Journal*, 2017, vol. 60, pp. 543–549. DOI: 10.1007/s11182-017-1106-7.

Подана в журнал: 02.08.2022
УДК 544.463:[669.21+546.73]
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.006-015

ВЛИЯНИЕ КРИОДЕФОРМАЦИИ СДВИГОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ Au-Co

Т. П. Толмачев^{1, 2, а), *}, В. П. Пилюгин^{2, 3, б)}, Н. В. Николаева²,
А. И. Анчаров^{4, 5, в)}, А. М. Пацелов^{2, г)}, Ю. В. Соловьева^{б, д)}, Т. И. Чашухина^{2, е)},
Л. М. Воронова^{2, ж)}, М. В. Дегтярев^{2, з)}

¹Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН,
ул. Комсомольская, 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, 620990 г. Екатеринбург, Российская Федерация

³Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 19, 620002 г. Екатеринбург, Российская Федерация

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
ул. Кутателадзе, 18, 630128 г. Новосибирск, Российская Федерация

⁵Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
пр-кт Ак. Лаврентьева, 11, 630090. г. Новосибирск, Российская Федерация

⁶Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Соляная пл., 2, 634003, г. Томск, Российская Федерация

- а)  <https://orcid.org/0000-0001-9073-4507>  tolmachev@imp.uran.ru;
б)  <https://orcid.org/0000-0002-5150-6605>  pilyugin@imp.uran.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0003-2258-437X>  ancharov@mail.ru;
г)  <https://orcid.org/0000-0001-6438-0725>  patselov@imp.uran.ru;
д)  <https://orcid.org/0000-0003-2362-0555>  j_sol@mail.ru;
е)  <https://orcid.org/0000-0002-7056-6937>  highpress@imp.uran.ru;
ж)  <https://orcid.org/0000-0002-0853-8126>  highpress@imp.uran.ru;
з)  <https://orcid.org/0000-0001-8482-4928>  degtyarev@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: tolmachev@imp.uran.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990, Российская Федерация
Тел.: (343) 378–38–05; факс: (343) 374–52–44

Методом сдвига (кручения) под давлением в условиях кипящего жидкого азота были синтезированы сплавы системы с ограниченной растворимостью Au-Co. Компоненты системы исходно находились в порошковом состоянии в виде смеси в эквиатомном соотношении. Механическое сплавление Au и Co осуществляли при различных оборотах наковальни. На полученных сплавах проводили фрактографическое исследование при помощи сканирующей электронной микроскопии, а также рентгенофазовый анализ по данным дифрактометрии в рентгеновском синхротронном излучении в геометрии на просвет в зависимости от величины деформации. Сделан вывод, что морфология поверхностей разрушения механически синтезированных сплавов Au-Co существенно зависит от величины деформации. Выявлено, что с ростом величины деформации возрастает взаимное перемешивание компонентов. По данным изображений поверхностей разрушения сплавов Au-Co, с ростом величины деформации и числа оборотов наковальни наблюдается переход от вязкого типа рельефа излома с включениями областей хрупкого межкристаллитного разрушения к вязкому типу рельефа излома по всей толщине образца. Дальнейший рост величины деформации и числа оборотов наковальни соответствует переходу от вязкого к хрупкому типу рельефа поверхности разрушения. Кроме того, по данным фрактографии сплавов Au-Co выявлено, что с ростом величин

ны деформации рельеф поверхности разрушения становится более гомогенным, а также уменьшается размер элементов структуры излома.

Ключевые слова: система Au-Co, механическое сплавление, сдвиг (кручение) под давлением, разрушение.

1. Введение

Максимальная растворимость для системы Au-Co в твердом состоянии составляет около 20 ат. % Co в матрице Au при температурах, близких 1000 °С, и практически отсутствует при комнатной и более низкой температурах [1–3]. Это обусловлено положительной энтальпией смешения рассматриваемых элементов, а также различием их физико-механических свойств [2, 4]. Рассматриваемая система представляет интерес в качестве основы для материалов, обладающих гигантским магнитосопротивлением [5], используемых в микроэлектронике в качестве контактов [6], в качестве сплавов для стоматологии [7] и катализаторов для снижения выбросов углекислого газа [8]. Ранее методом сдвига (кручения) под давлением [9–11] для данной системы были получены твердые растворы и сделан вывод, что снижение температуры синтеза до криогенной (температуры жидкого азота) приводит к интенсификации процессов образования неравновесных растворов [12, 13].

Одним из методов исследования прочностных свойств сплавов является изучение морфологии их изломов с помощью электронной микроскопии [14–16]. Метод позволяет оценить влияние условий деформации на процесс разрушения сплава. Известно, что величина деформации при сдвиге под давлением меняется с радиусом образца [9–11], что может существенно повлиять на прочностные свойства сплава.

Цель настоящей работы – анализ морфологии поверхностей разрушения сплавов Au-Co, которые были получены механическим сплавлением методом сдвига под давлением при температуре кипения жидкого азота и при различном числе оборотов наковальни, в зависимости от величины деформации.

2. Методы исследования

Для деформационных криообработок использовали эквиатомную смесь порошков кобальта и золота с размером частиц 50 и 300 мкм и чистотой 99,60 % и 99,99 %, соответственно. Применяли плоские наковальни Бриджмена из ВК-6 твердостью 92 HRA, с диаметром рабочих площадок 5 мм. Степень деформации, реализованной в ходе сдвига под давлением, оценивали по формуле для истинной деформации [11]. Число оборотов наковален при механосплавлении составляло 1, 15 и 30.

Аттестацию структуры синтезированных трехступенчатым переделом [17] образцов проводили методом рентгеновской дифрактометрии в синхротронном излучении ($\lambda = 0,3685 \text{ \AA}$) [18]. Суммарное число оборотов при такой обработке составило 30, число оборотов при каждой стадии передела составило 10. Трехступенчатый передел использовали для получения однородного состояния твердого раствора по радиусу образца. Дифракционные картины получали на детекторе Marr345 (Marr Research). По данным дифрактометрии вычисляли период кристаллической решетки сплава и оценивали концентрацию Au и Co.

Синтезированные методом кручения под давлением образцы имели дискообразную форму толщиной не более 100 микрон. Для изучения микроструктурных особенностей синтезированных сплавов и оценки влияния на них степени деформации полученные образцы разрушали путем скола по диаметру в среде жидкого азота, после чего поверхности изломов изучали на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta-200 Pegasus.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Фазовый состав сплавов системы Au-Co

По данным рентгенофазового анализа в центре (рис. 1 а) и на краю (рис. 1 б) образца, синтезированного трехступенчатым переделом [12] с суммарным числом оборотов наковальни, равным 30, сформирована фаза ГЦК-твердого раствора Au-Co с периодом $a = 0,395$ нм в центральной части и $a = 0,391$ – на краю образца. Оценка соотношения элементов показала содержание кобальта около 35 ат. % в центре и около 40 – на краю образца. Таким образом, в результате трехступенчатого передела однородное состояние твердого раствора не достигается. Имеется зависимость доли деформационно-растворенного Co в твердом растворе от радиуса образца, т.е. от величины деформации.

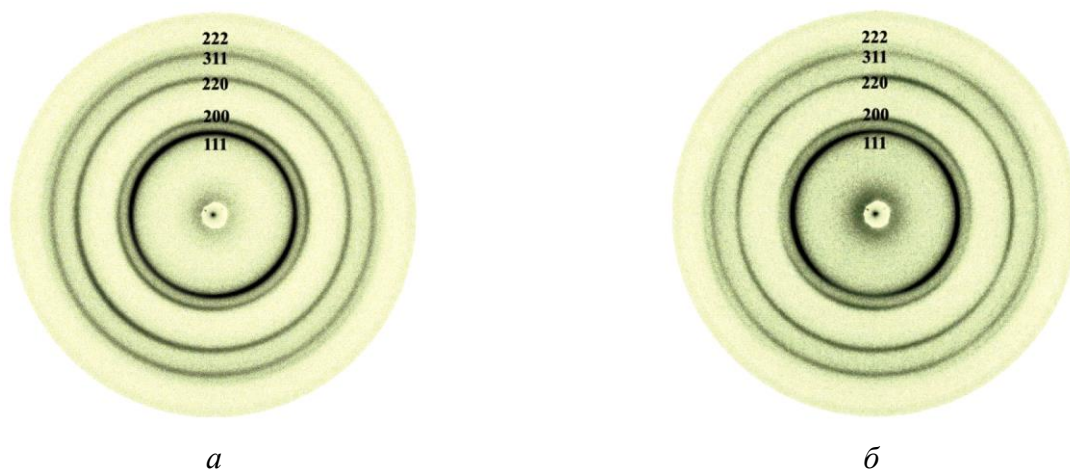


Рис. 1. Рентгеновский дифракционный анализ в синхротронном излучении: а – для центральной области образца; б – для края образца, синтезированного при 30 оборотах наковален

В результате каждого деформационного передела, равного 10 оборотам наковальни, величина деформации в центре и на краю образца значительно отличается. В центральной части образца истинная деформация составила $e = 3,7$ ($r = 0,1$ мм, $h = 150$ мкм), а на краю – $9,2$ ($r = 2,4$ мм, $h = 15$ мкм). Можно заключить, что большее значение величины деформации механосинтезированного при криотемпературе образца соответствует формированию твердого раствора Au-Co с большей концентрацией кобальта.

3.2. Анализ морфологии поверхностей изломов

Анализ морфологии поверхностей изломов образцов сплавов Au-Co показал, что характер рельефа поверхностей разрушения меняется как на одном образце с ростом степени деформации вдоль радиуса диска r , так и с увеличением числа оборотов наковальни Бриджмена при фиксированном значении r .

Разрушение образца, синтезированного криодеформацией на 1 оборот наковальни, что отвечает истинной деформации $e = 1,5$ в центральной части и $6,9$ на краю образца, носит преимущественно вязкий характер: формируется ямочный тип рельефа (рис. 2 а). В то же время в центральной части образца наблюдаются области с хрупким межкристаллитным характером разрушения (рис. 2 а, стрелка), который соответствует поверхности агрегата из частиц с размером в несколько микрон, что можно связать с достаточно неоднородной структурой самого образца в результате такого числа оборотов. Можно сделать вывод, что величины деформации, реализованной при 1 обороте наковальни, по-видимому, недостаточно

для активации процессов деформационного перемешивания на микроуровне (частиц порошков), по крайней мере, в центральной части образца. На краю образца с достижением большей величины деформации излом полностью вязкий (рис. 2 б).

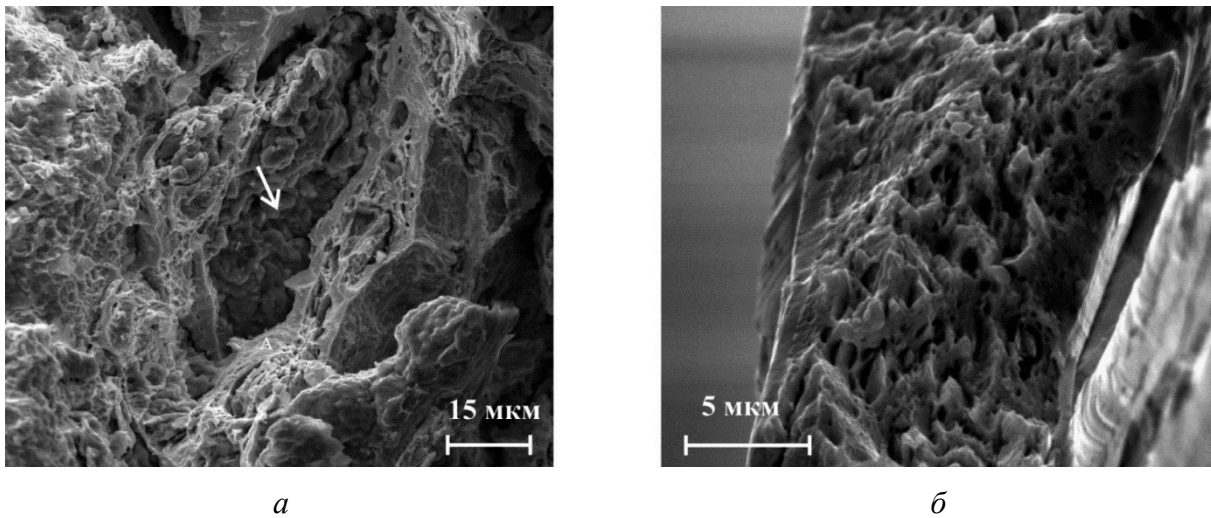


Рис. 2. Поверхность разрушения в центре (а) и на краю (б) образца сплава Au-Co, полученного криодеформацией на 1 оборот при 8 ГПа, $e = 1,5$ и $6,9$ соответственно

Увеличение числа оборотов наковальни и, соответственно, степени деформации приводит ко все большему измельчению и гомогенизации структуры. Так, центральная часть поверхности разрушения образца, синтезированного при 30 оборотах наковальни, существенно более однородна по сравнению с таковой для образцов, полученных деформацией на 1 и 15 оборотов наковальни (рис. 2 а, рис. 3 а и рис. 4 а). При этом характер разрушения центральной части образцов остается вязким как для 15 (рис. 3 а), так и для 30 (рис. 4 а) оборотов наковальни. На краю образца, синтезированного при 15 оборотах наковальни, излом состоит преимущественно из участков вязкого и вязко-хрупкого разрушения (рис. 3 б). При этом вязкий характер разрушения с четко выраженным ямочным рельефом имеют области вдоль центральной плоскости образца. Вязко-хрупкий характер разрушения с редко встречающимися ямками и преимущественно ультрамелкозернистым рельефом излома наблюдается вдоль внешних поверхностей образца.

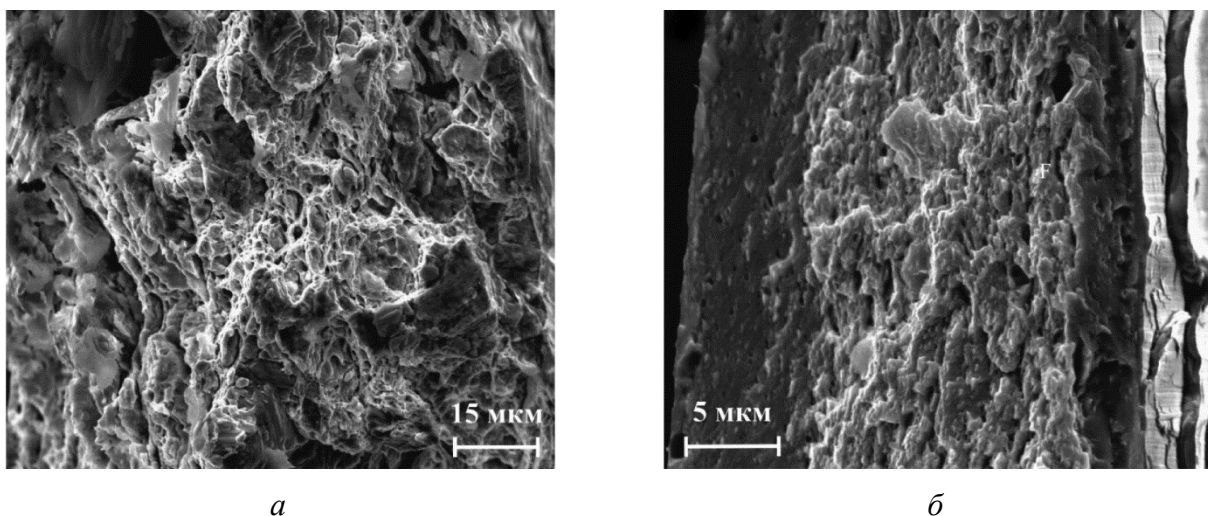


Рис. 3. Поверхность разрушения в центре (а) и на краю (б) образца сплава Au-Co, полученного криодеформацией на 15 оборотов при 8 ГПа, $e = 4,8$ и $8,7$ соответственно

Однако разрушение структуры на краю образца, полученного в результате криодеформации на 30 оборотов наковальни, носит преимущественно хрупкий характер (рис. 4 б): по поверхности разрушения проходят вторичные трещины, а также равномерно распределены ямки, образовавшиеся, по-видимому, от областей с отличным составом и прочностными свойствами по сравнению с остальной частью образца.

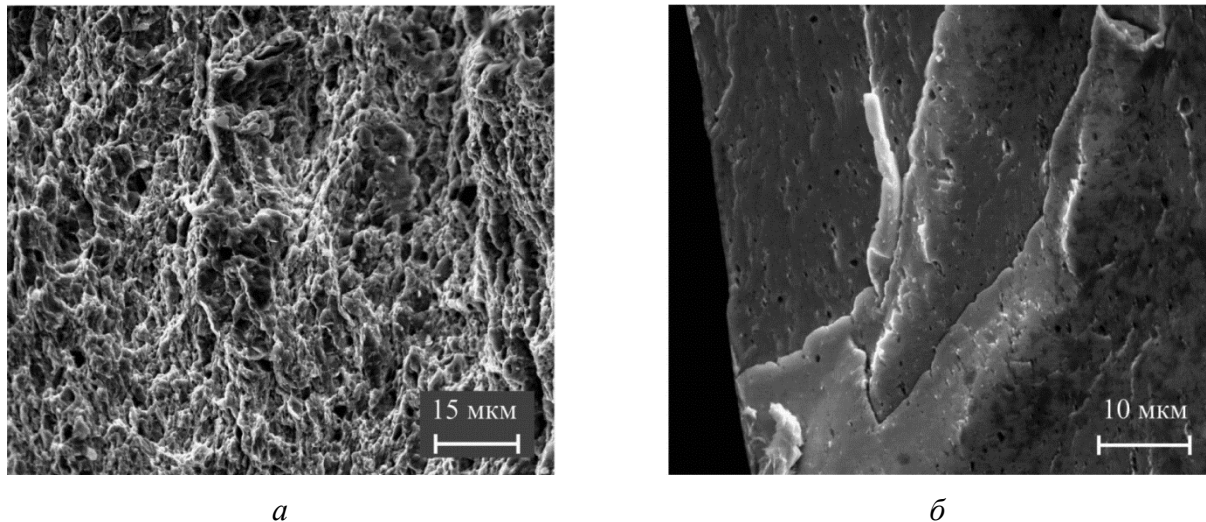


Рис. 4. Поверхность разрушения в центре (а) и на краю (б) образца сплава Au-Co, полученного криодеформацией на 30 оборотов при 8 ГПа, $e = 4,9$ и $9,3$ соответственно

Обнаруженный переход от вязкого к хрупкому типу разрушения с достижением на краю образца величины деформации $e = 9,3$ связан, по-видимому, с ростом доли растворенного Co в матрице Au.

Закономерности изменения рельефа поверхности излома от степени деформации отражены в таблице.

Зависимость характера рельефа поверхности разрушения от величины деформации

Число оборотов	Положение излома	Величина деформации e	Характер рельефа излома	Гомогенность излома
1	Центр	1,5	Вязкий+хрупкий	Негомогенный
	Край	6,9	Вязкий	Гомогенный
15	Центр	4,8	Вязкий+хрупкий	Негомогенный
	Край	8,7	Хрупко-вязкий	Гомогенный
30	Центр	4,9	Вязкий	– « –
	Край	9,3	Хрупкий	– « –

4. Заключение

В результате механического сплавления компонентов системы с ограниченной растворимостью Au-Co методом сдвига (кручения) под давлением в кипящем азоте в зависимости от величины деформации изменяется характерный тип поверхности разрушения полученных сплавов.

Наблюдается увеличение гомогенности излома с ростом числа оборотов наковальни и величины деформации

С ростом величины деформации наблюдается переход от вязкого излома с включениями областей хрупкого межкристаллитного разрушения к однородно вязкому по всей толщине образца. Дальнейший рост величины деформации соответствует переходу от вязкого к хрупкому типу рельефа поверхности разрушения.

Наблюдается уменьшение размеров элементов структуры поверхности излома с ростом величины деформации по данным изображений поверхностей разрушения сплавов.

По данным рентгенофазового анализа в синхротронном излучении в геометрии на просвет установлено, что большее значение величины деформации механосинтезированного при криотемпературе образца соответствует формированию твердого раствора Au-Co с большей долей кобальта, а в результате трехступенчатого передела однородное состояние твердого раствора не достигается. Можно связать хрупкий тип поверхности разрушения с большим содержанием деформационно-растворенного кобальта и значительной величиной деформации.

Благодарность

Получение и обработка материалов производились на базе ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург. Электронно-микроскопические исследования проводились на оборудовании ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург. Рентгеновские синхротронные измерения проведены на экспериментальной станции «Дифрактометрия в «жестком» рентгеновском диапазоне» ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения», ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-32-60039 и частично в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Давление», № 122021000032-5).

Литература

1. Miedema A. R., De Chatel P. F., De Boer F. R. Cohesion in alloys – fundamentals of a semi-empirical model // *Physica B.* – 1980. – Vol. 100. – P. 1–28. – DOI: 10.1016/0378-4363(80)90054-6.
2. The Au-Co (Gold-Cobalt) system / H. Okamoto, T. B. Massalski, M. Hasebe, T. Nishizawa // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams.* – 1985. – Vol. 6. – P. 449–454. – DOI: 10.1007/BF02869509.
3. Барабаш О. М., Коваль Ю. Н. Структура и свойства металлов и сплавов. – Киев : Наукова думка, 1986. – 599 с.
4. Свойства элементов : справочник / М. Е. Дриц, П. Б. Будберг, Г. С. Бурханов, А. М. Дриц, В. М. Пановко / под ред. М. Е. Дрица – М. : Металлургия, 1985 – 672 с.
5. Bernardi J., Hutten A., Thomas G. GMR behavior of nanostructured heterogeneous M-Co (M=Cu, Ag, Au) alloys // *Nanostructured Materials.* – 1996 – Vol. 7, Nos. 1/2. – P. 205–220. – DOI: 10.1016/0965-9773(95)00310-X.
6. Park J., Bae S. H., Son I. Improved contact resistance and solderability of electrodeposited Au-Sn alloy layer with high thermal stability for electronic contacts // *Applied Surface Science.* – 2021. – Vol. 551. – P. 149405. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149405.
7. Fredriksson H., Sunnerkrantz P. A., Victorin L. A binary dental gold-cobalt alloy of eutectic composition // *Acta Odontologica Scandinavica.* – 1983. – Vol. 41, iss. 3. – P. 135–141. – DOI: 10.3109/00016358309162314.

8. Construction of a gold-cobalt alloy catalyst to enhance the green reduction of carbon dioxide / Y. Zhou, X. Wang, X. Huang, H. Deng, Y. Hu. // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2022. – Vol. 65. – P. 102245. – DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102245.
9. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / А. М. Глезер, Э. В. Козлов, Н. А. Конева, Н. А. Попова, И. А. Курзина / под ред. А. М. Глезера – М. : Физматлит, 2016. – 304 с.
10. Harsha R. N., Mithun Kulkarni V., Satish Babu B. Severe Plastic Deformation – A Review // *Materials Today : proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 10. – P. 22340–22349. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.600.
11. Degtyarev M. V. Multistage nature of the structure evolution in iron and structural steels upon shear under pressure // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2005. – Vol. 99, No. 6. – P. 595–608.
12. The formation, structure, and properties of the Au–Co alloys produced by severe plastic deformation under pressure / T. P. Tolmachev, V. P. Pilyugin, A. I. Ancharov, E. G. Chernyshev, A. M. Patselov // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117. – P. 135–142. – DOI: 10.1134/S0031918X16020125.
13. Stages of Mechanical Alloying in Systems with Different Solubility Cu–Zn and Au–Co in the Case of Cold and Low-Temperature Deformation by Torsion Under Pressure / T. P. Tolmachev, V. P. Pilyugin, A. M. Patselov, O. V. Antonova, E. G. Chernyshev, A. I. Ancharov, M. V. Degtyarev // *Russian Physics Journal*. – 2018 – Vol. 61. – P. 942–948. – DOI: 10.1007/s11182-018-1481-8.
14. Failure Analysis and Prevention : ASM Handbook / ed. by B. A. Miller, R. J. Shipley, R. J. Parrington, D. P. Dennies. – Materials Park, OH, ASM International, 2021. – Vol. 11. – 856 p.
15. Mechanical behavior and fracture surface characterization of liquid-phase sintered Cu–Sn powder alloys / A. E. Nassef, A. I. Alateyah, M. A. El-Hadek, W. H. El-Garaihy // *Advanced Materials Letters*. – 2017. – Vol. 8, iss. 6. – P. 717–722. – DOI: 10.5185/amlett.2017.1485.
16. Al based layered in situ metal-matrix composites fabricated by constrained high pressure torsion / G. F. Korznikova, E. A. Korznikova, G. R. Khalikova, K. S. Nazarov, R. Kh. Khisamov, S. N. Sergeev, R. U. Shayakhmetov, R. R. Mulyukov // *Letters on Materials*. – 2021. – Vol. 11 (4s). – P. 533–543. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-533-543.
17. Study of the phase composition and homogeneity of Fe–Cu alloys prepared by mechanoactivation under pressure / E. G. Chernyshev, V. P. Pilyugin, A. M. Patselov, V. V. Serikov, N. M. Kleinerman // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2001. – Vol. 92, No. 2. – P. 179–184.
18. Ancharov A. I. The use of hard synchrotron radiation for diffraction studies of composite and functional materials // *Russian Physics Journal*. – 2017. – Vol. 60. – P. 543–549. – DOI: 10.1007/s11182-017-1106-7.