

УДК 532.614

СМАЧИВАНИЕ РАСПЛАВОМ НИКЕЛЯ ПОВЕРХНОСТИ И ГРАНИЦ ЗЕРЕН ВОЛЬФРАМА

© 2026 г. Б. Б. Страумал^{а, *}, В. М. Кийко^а, В. Г. Сурсаева^а

^аИнститут физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, 142432 Россия

*e-mail: straumal@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 02.02.2026 г.

После доработки 20.03.2026 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Представлены описания получения поликристаллического и бикристаллического образцов вольфрама. Описана технологическая схема смачивания твердого вольфрама расплавом никеля в вакууме при температурах 1550–1800°C. Структура и состав образцов исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Наблюдалось образование химических соединений Ni_4W , NiW_2 и твердых растворов никель–вольфрам в областях вдоль исходных границ раздела никель–вольфрам. Определены убывающие значения краевых углов смачивания никелем вольфрама от $\sim 15^\circ$ до 4° с ростом температуры в указанном интервале температур. В бикристалле вольфрама обнаружено проникновение расплава никеля по границе раздела между зернами (ГЗ). Содержание никеля убывает вдоль ГЗ от поверхности образца в глубину в квадратичной зависимости. Характер взаимодействия поликристаллического и бикристаллического вольфрама с расплавом никеля практически одинаковый. Полученные результаты могут найти применение при разработке композитных материалов и сплавов, включая псевдосплавы, при определении области их использования, а также оптимизировать процессы пайки и получения покрытий, содержащих никель, на тугоплавких металлах.

Ключевые слова: никель, вольфрам, температура, расплав, краевой угол смачивания, структура, химическое взаимодействие, твердый раствор, поликристалл, бикристалл, граница раздела.

DOI: 10.7868/S3034573126060011

ВВЕДЕНИЕ

Исследование термодинамических характеристик взаимодействия жидкостей с твердыми телами, таких как поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, адгезия, а также наличие или отсутствие фазового взаимодействия на межфазной границе являются важными задачами физического материаловедения. Атомное взаимодействие контактирующих металлов при смачивании с образованием химических соединений, а также фазовые переходы приводят к резкому изменению свойств, таких как диффузионная проницаемость и энергия границ зерен, адсорбция, прочность, теплопроводность, электросопротивление [1–3]. Учет этих характеристик позволяет эффективно выбирать составы и режимы получения композитных материалов и сплавов, включая псевдосплавы,

определять области их применения, а также оптимизировать процессы пайки и нанесения покрытий [4–10]. Мерой смачивания между смачиваемой поверхностью и поверхностью жидкости является краевой угол на периметре смачивания. В статически равновесных условиях он определяется уравнением Юнга и связан с поверхностным натяжением жидкости, твердого тела и межфазным натяжением на границе твердое тело–жидкость [6, 11–13]. Процессы смачивания в значительной степени зависят от температуры и времени [14, 15]. Кроме собственно поверхностного смачивания может наблюдаться проникновение расплава по границам зерен твердого материала [16–18]. Перечисленные аспекты в полной мере можно отнести к материалам системы Ni–W [19]. Рассмотрение смачиваемости и химического взаимо-

действия является необходимым этапом этих многоплановых исследований [20], цель которого в настоящей работе — изучение процессов взаимодействия между расплавом никеля и твердой поверхностью вольфрама и — при обнаружении — химического взаимодействия и кинетики зернограничного проникновения при различных температурах. Температурно-временные параметры режимов экспериментов выбирались с учетом результатов, полученных в работах [21, 22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходными материалами образцов служили прутки никеля (ООО НПО “Феникс”, СПб) чистотой 99.95 масс. % и вольфрам чистотой 99.9 масс. % (ООО НПО “Экотек”, Кемерово). На электроэрозионном станке из никеля вырезались брусочки массой 0.15 г, которые затем расплавлялись. Заготовки образцов из вольфрама, предназначенных в качестве твердого смачиваемого материала с поликристаллической структурой, вырезались в форме таблеток круглой формы высотой 5 мм и диаметром 11.5 мм. Верхняя поверхность таблеток шлифовалась, и на нее в центре помещался один из брусочков никеля, как показано на рис. 1. Образцы для изучения поверхностного смачивания изготавливались в промышленной вакуумной установке “Кристалл-607” [23] с индукционным нагревом, в процессе которого никель плавился и растекался по твердой шлифованной поверхности. Форма образца в виде кругового цилиндра коррелировала с формой камеры высокотемпературной части установки, обеспечивая ее осесимметричный нагрев-охлаждение. Затем установка

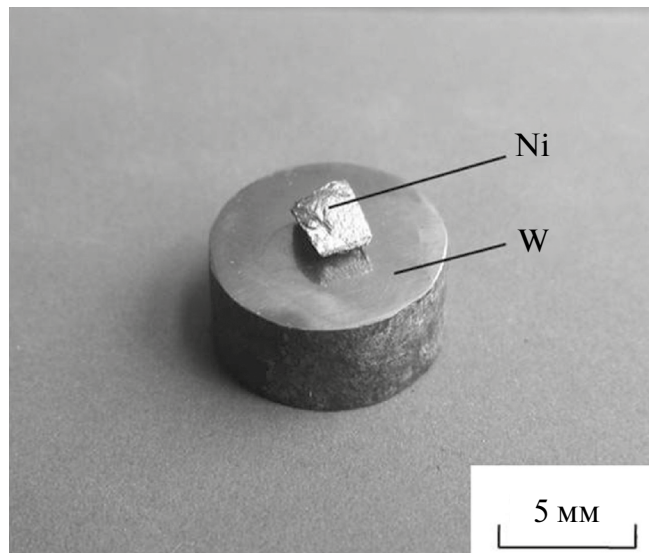


Рис. 1. Заготовка образца 1 Ni на W.

с образцом охлаждалась до комнатной температуры в течение трех часов. Для изучения проникновения расплава по границам зерен из вольфрама выращивались специальные бикристаллы в экспериментальной ростовой установке “Зона” Института физики твердого тела РАН. Режимы получения образцов указаны для каждого образца ниже. Полученные образцы препарировались: разрезались в вертикальной плоскости и шлифовались на бумаге зернистостью до 2000. Затем их структура исследовалась на оптическом микроскопе и сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) CamScan MV230 (VEGA TS 5130MM) и Tescan VEGA-II XMU, причем последние оснащены энергодисперсионными спектрометрами, позволяющими исследовать элементный состав материала в указанных “точках”. По снимкам, полученным под микроскопами, в компьютерной программе Photoshop измерялись краевые углы смачивания. На основе результатов рентгено-спектрального анализа определялись химические элементы в заданных “точках” с характерными размерами в единицы микрометров, а по диаграмме состояния [19] устанавливалось наличие химических соединений.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЧИВАНИЯ И СТРУКТУРА Ni–W ОБРАЗЦОВ

Рассмотрим результаты плавления никеля на поверхности вольфрама с изотермической выдержкой при температуре, незначительно превышающей температуру плавления никеля, 1550°C в течение 1 часа. Участок верхней поверхности образца 1 покрывался никелем, как показано на рис. 2а. На рис. 2б показан участок этой поверхности, включающий границу зоны смачивания никелем вольфрама. Съемка под микроскопом позволяет наблюдать структуру различных участков поверхностей: гладких вблизи границы вольфрам–никель и “гексагонального” рельефа материала, содержащего никель. Гексагональная структура возникает при кристаллизации богатого никелем расплава. Такой вид поверхности существенно отличается от результатов по смачиванию молибдена расплавом меди, выполненного в том же температурно-временном режиме [14].

По снимку шлифа вертикального сечения (рис. 3а) был определен краевой угол смачивания $\Theta = 15^\circ 6' \pm 36'$, его величина указывает на хорошую смачиваемость указанной пары в приведенном режиме. По границе никель–вольфрам обнаружено их взаимодействие (“вертикальные” светлые “штрихи” вдоль границы раздела никель–вольфрам на рис. 3а). На рис. 3б показан участок

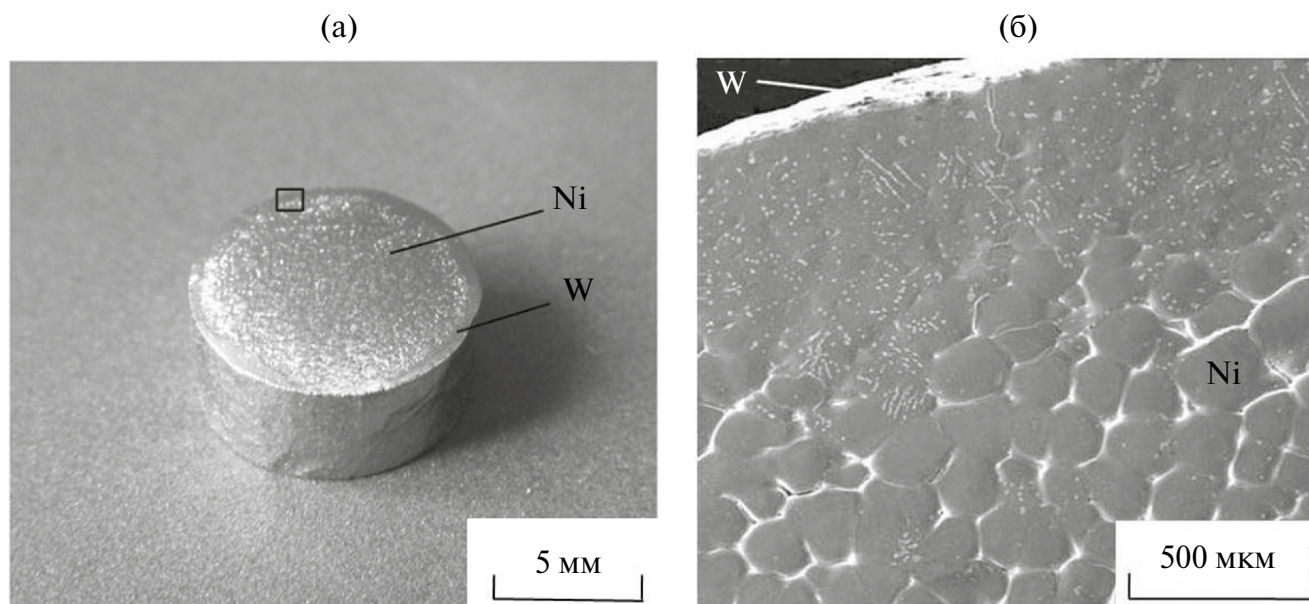


Рис. 2. Общий вид образца 1 (а) с выделенным рамкой участком, показанным на рис. 2б.

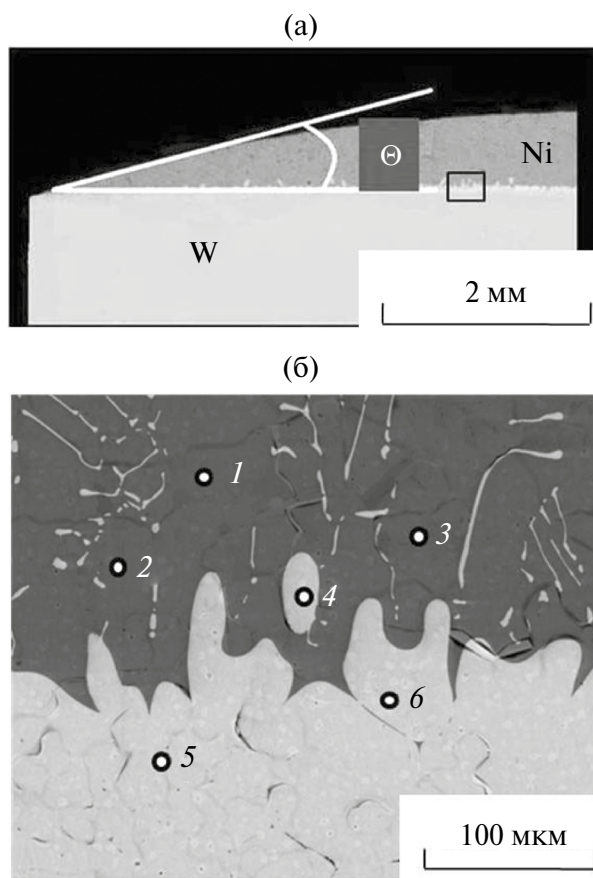


Рис. 3. Участок вертикального сечения образца 1, Θ — краевой угол смачивания (а), рамкой выделен участок, показанный на рис. 3б: точками 1–6 обозначены области элементного рентгеноспектрального микроанализа, результаты которого представлены в тексте.

границы между никелем и вольфрамом, выделенный рамкой на рис. 3а. Анализ содержания химических элементов в точках 1–6, указанных на рисунке, показал, что в точках 1–3 отношение атомов никеля к вольфраму составляет 4:1, что соответствует соединению Ni_4W , а в “точках” 4–6 в основном содержится вольфрам с небольшим содержанием никеля [19].

На втором образце было изучено смачивание расплавом никеля поверхности вольфрама при более высокой температуре (1800°C , 1 ч). СЭМ-микрофотографии участков металлографического шлифа вертикального сечения этого образца показаны на рис. 4 с краевым углом смачивания Θ , равным $3^\circ 46' \pm 7'$, на верхней поверхности образца (рис. 4а). На рис. 4б показан результат взаимодействия никеля и вольфрама вдоль границы смачивания: в точках 1–3 — твердые растворы с преобладанием никеля, в точках 4 и 5 обнаружено соединение Ni_4W , в точке 6 — соединение NiW_2 , а в точках 7–8 — твердые растворы с преобладанием вольфрама [19].

Далее представлены результаты по смачиванию границ раздела монокристаллов вольфрама расплавом никеля при температуре 1600°C с выдержкой в течение 1 ч. Выбор бикристалла в значительной степени обусловлен относительной простотой объекта в сравнении с поликристаллическим, приближая его к модельному. Как смачивание поверхности, так и проникновение и распределение жидких фаз по границам зерен играет важную роль в синтезе тугоплавких металлов [18], в том числе в системе Ni–W [19], влияя

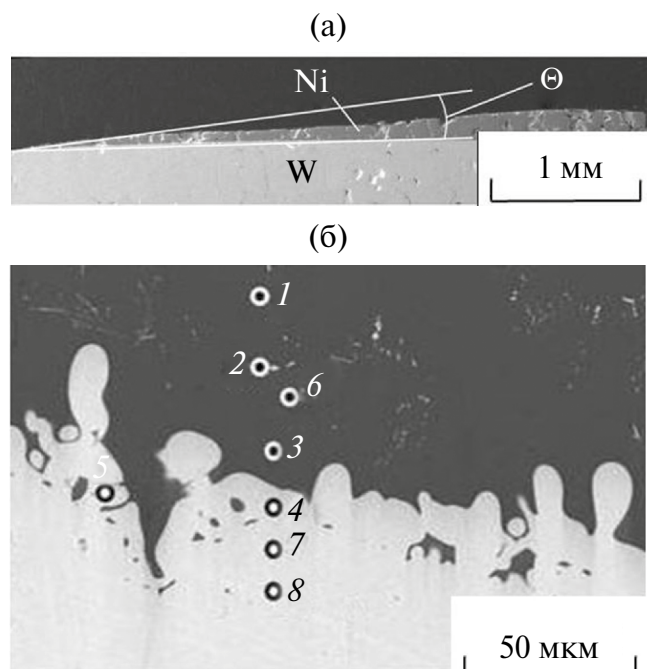


Рис. 4. Участки вертикального сечения образца 2, Θ — краевой угол смачивания (а); точками 1–8 обозначены области элементного рентгеноспектрального микроанализа (б), результаты которого представлены в тексте.

на их прочность, теплопроводность, электропроводность и другие свойства. Далее показаны полученные зависимости содержания никеля вдоль границы раздела зерен вольфрама от краев образца 3 (рис. 5).

Краевой угол смачивания Θ расплава никеля на монокристалле вольфрама, показанный

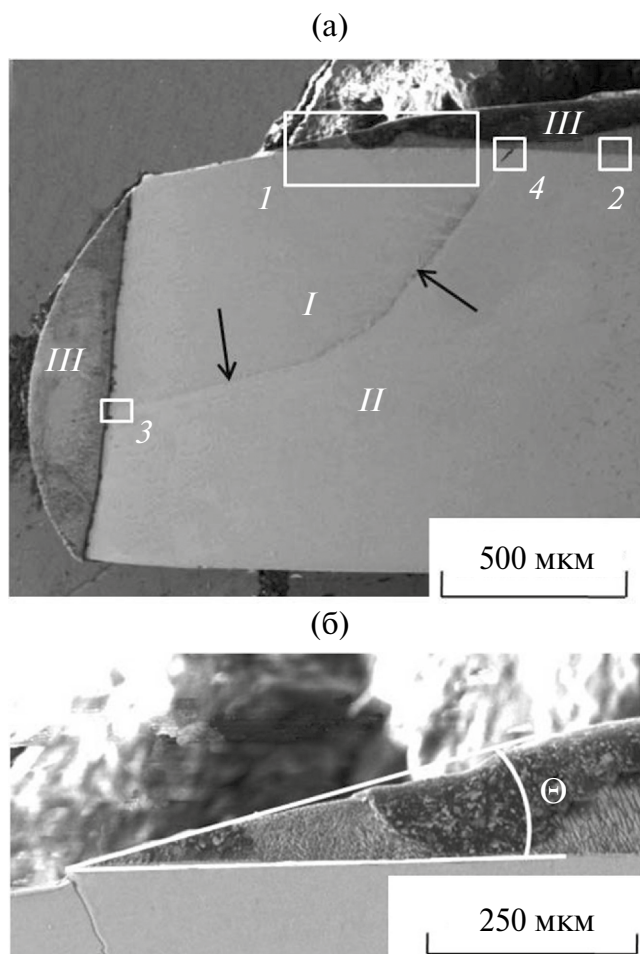


Рис. 5. Вертикальное сечение участка образца 3 би-кристалла вольфрама (*I* и *II*), покрытого расплавом никеля (*III*) (а), рамками выделены области, показанные на рисунках 5б, 6а, 7а и 8а. Θ — краевой угол смачивания (б).

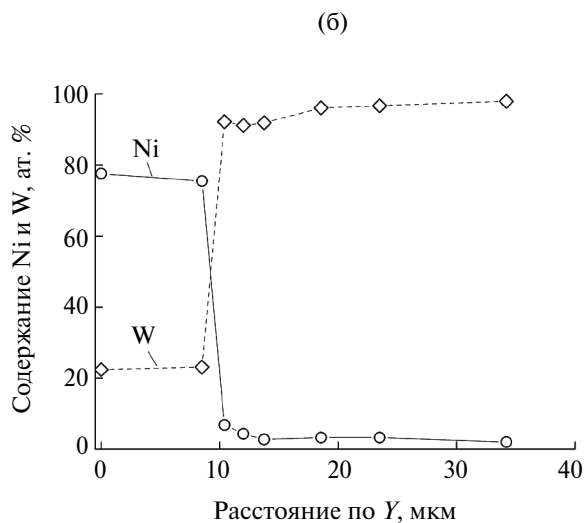
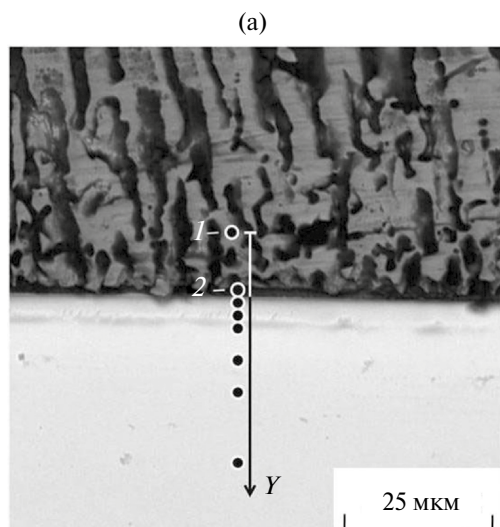


Рис. 6. (а) — Участок вертикального сечения образца 3, выделенный рамкой 2 на рис. 5а, точки — места рентгеноспектрального микроанализа; (б) — содержание никеля и вольфрама в точках вдоль оси *Y*, показанных на рис. 6а.

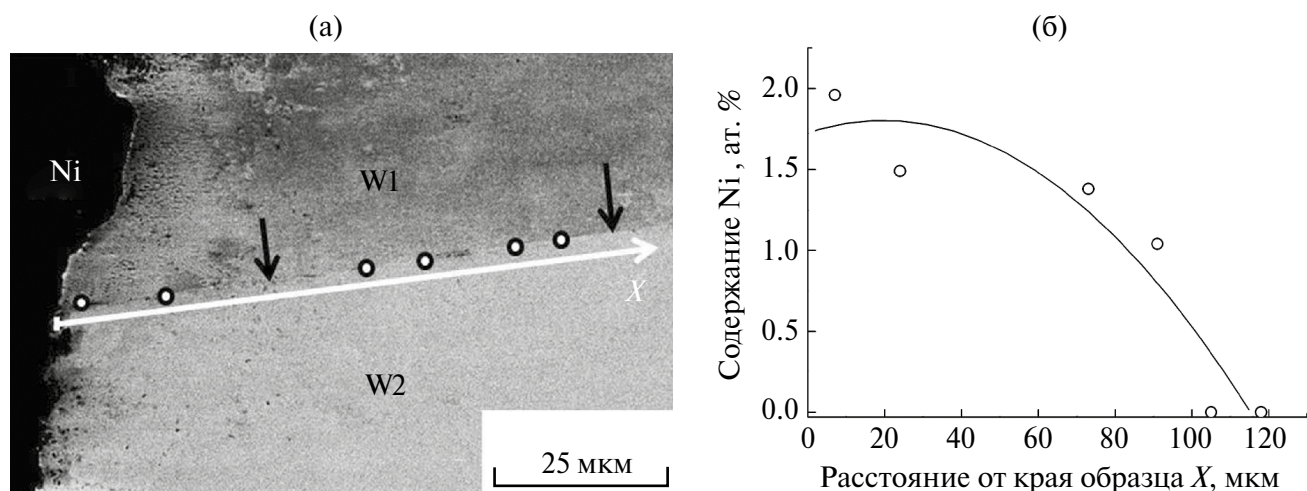


Рис. 7. (а) — Участок вертикального сечения образца 3, выделенный рамкой 3 на рис. 5а, стрелками указана граница раздела между зернами; (б) — содержание никеля в “точках” вдоль оси X, показанных на рис. 7а.

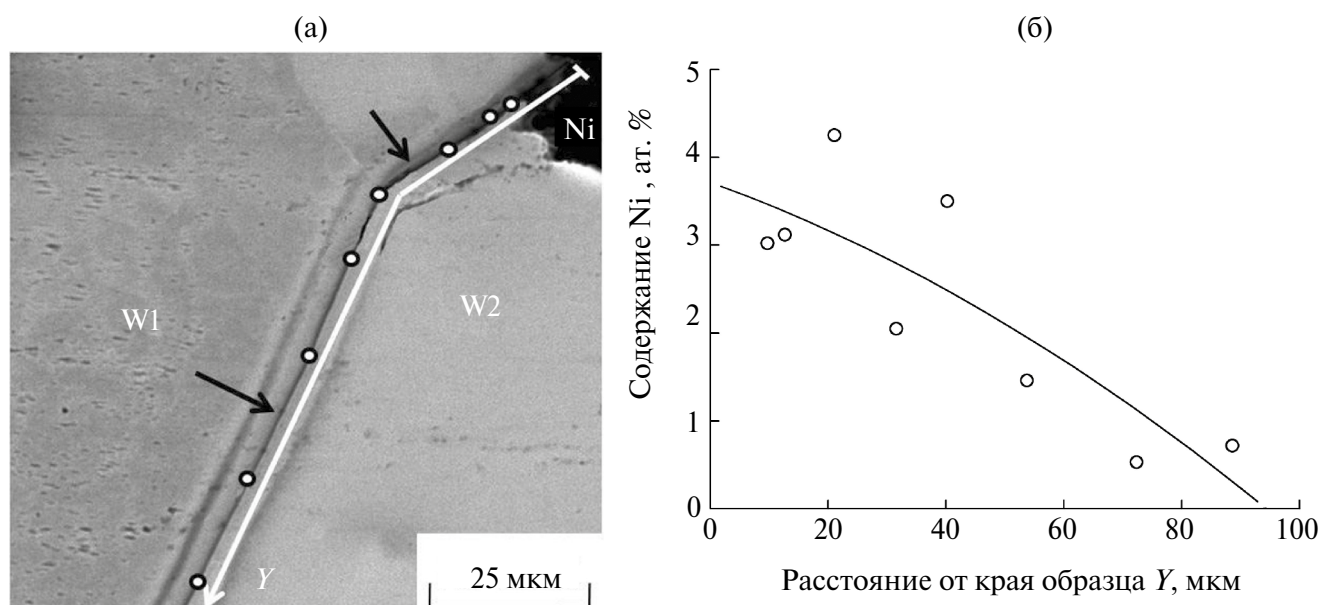


Рис. 8. (а) — Участок вертикального сечения образца 3 Ni-W, выделенный рамкой 4 на рис. 5а, стрелками указаны границы раздела между зернами; (б) — содержание никеля в точках вдоль оси Y, показанных на рис. 8а.

на рис. 5б, составляет $13^{\circ}48' \pm 12'$, что примерно соответствует углу смачивания $\Theta = 15^{\circ}6' \pm 36'$ на поликристаллическом вольфраме (см. рис. 3) в примерно таких же температурно-временных условиях эксперимента (с выдержкой $1550^{\circ}\text{C} - 1 \text{ ч}$).

В точках, показанных на рис. 6а, был проведен локальный рентгеноспектральный микроанализ с определением содержания никеля и вольфрама, результаты которого показаны на графике рис. 6б. Судя по графику и диаграмме состояния Ni-W [20], в областях точек 1 и 2 рис. 6а содер-

жится соединение Ni_4W , а в районах остальных (непронумерованных) точек практически чистый вольфрам.

На рис. 7а показан участок сечения вольфрамового образца 3, покрытого расплавом никеля, с границей раздела между двумя зернами вольфрама W1 и W2, выделенный рамкой 3 на рис. 5а. X — расстояние от края образца вдоль границы раздела между двумя зернами вольфрама W1 и W1, черно-белые точки — места рентгеноспектрального микроанализа, результаты которого показаны на рис. 7б.

Аналогичные измерения были проведены на участке 4 (рис. 5а) этого же образца, и получены подобные результаты, показанные на рис. 8.

Аппроксимация значений содержания никеля по расстояниям от кромок образца вдоль границы между кристаллами вольфрама дает примерно квадратичную зависимость их убывания, — см. рис. 7б и 8б.

Наблюдавшееся в работе убывание контактных углов между границами зерен и расплавом, богатым никелем, с ростом температуры может свидетельствовать о том, что в системе вольфрам–никель происходит переход от неполного смачивания границ к полному, как, например, это наблюдалось в других высокотемпературных материалах [24]. Недавно было показано, что изменения морфологии частиц или прослоек второй фазы на границах зерен при их смачивании расплавом может существенно изменять, например, механические свойства материала [25, 26]. Это означает, что и в системе вольфрам–никель можно использовать смачивание границ для управления свойствами материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— При температурах в интервале 1550–1800°C определены краевые углы смачивания расплавами никеля твердого вольфрама. Значения углов на поликристаллическом и монокристаллическом вольфраме в одинаковых условиях экспериментов одинаковы. Величины углов убывают с увеличением температуры.

— Обнаружено взаимодействие расплава никеля и твердого вольфрама при температурах 1550°C, 1600°C и 1800°C с образованием соединения Ni_4W и твердых растворов, а при температуре 1800°C, кроме того, и соединения NiW_2 .

— Проникновения расплава никеля по границам разделов монокристаллов вольфрама от поверхности образца до глубины 100 мкм при температуре 1600°C в течение 1 ч имеют квадратичную убывающую зависимость.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Я.Ю. Слижевской, А.Н. Некрасову и С.А. Абашкину за помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств госзадания Института физики твердого тела РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Страумал Б.Б.* Фазовые переходы на границах зерен. М.: Наука, 2003. 328 с.
2. *Дохов М.П.* // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2019. № 2. С. 83.
3. *Starikov S., Abbass A., Drautz R., Mrovec M.* // Acta Mater. 2023. V. 261. P. 119399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119399>
4. *Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.* Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
5. Пат. 2 337 308 С2 (РФ). Способ получения облицовки для кумулятивного заряда из композиционного псевдосплава Мо–Cu / Белов В.Ю., Качалин Н.И., Малинов В.И., Тихий Г.А., Свирский О.В., Климов С.А., Скляр В.М. // Опубл. 27.10.2008.
6. *Пославский А.П., Сорокин В.В.* Определение характеристик смачивания и растекания жидкого припоя по поверхности металла. Оренбург: ОГУ, 2003. 15 с.
7. *Гавриш С.В., Логинов В.В., Петренко Н.Ю., Пучнина С.В.* // Сварочное производство. 2019. № 9. С. 25.
8. Справочник по пайке под ред. Петрунина И. Е. / М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
9. *Ланцев Е.А., Малехонова Н.В., Нохрин А.В., Сметанина К.Е., Мурашов А.А., Воронин А.В., Благовещенский Ю.В., Терентьев А.В.* // Журнал технической физики. 2025. Т. 95. № 7. С. 1346. <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.07.60657.150-24>
10. *Zhang H.T., Schuster B.E., Ramesh K.T., Valiev R.Z., Kecskes L.J., Dowding R.J., Magness L., Cho K.* // Acta Materialia. 2006. V. 54. № 15. P. 4079. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.005>
11. Физический словарь / Под ред. Прохорова А.М. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
12. Политехнический словарь / Под ред. Ишлинского А.Ю. М.: Советская энциклопедия, 1989. 656 с.
13. *Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.* Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
14. *Кийко В.М., Слижевская Я.Ю.* // Деформация и разрушение материалов. 2025. № 11. С. 36. <https://doi.org/10.31044/1814-4632-2025-11-36-40>
15. Цветные металлы и сплавы. Справочник. Медные припои [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://lib-metal.ru/cu/cu-priпой-1.htm> (дата обращения 22.10.2025).
16. *Klinger L., Rabkin E.* // Scripta mater. 2010. V. 62. P. 918. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.02.029>

17. Zheng X.-R., Kong X.-S., Liu C.S., Zhou X. // *Acta Materialia*. 2025. V. 296. P. 121267.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121267/>
18. Проценко П.В. Смачивание поверхностей и границ зерен тугоплавких металлов легкоплавкими расплавами: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / М., 2002. 211 с.
19. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. Т. 2 / Под ред. Лякишева Н.П. М.: Машиностроение, 1997. 1023 с.
20. Захарова Т.В. Растекание расплавленных металлов по твердым поверхностям, смачивание, адсорбция и адгезия фаз: автореферат на соискание доктора химических наук. / Екатеринбург: Институт металлургии УрО АН., 1997. 55 с.
21. Glebovsky V.G., Straumal B.B., Semenov V.N., Sursaeva V.G., Gust W. // *High Temp. Mater. Proc.* 1994. V. 13. P. 67.
22. Straumal B., Semenov V., Sursaeva V., Gust W. // *Plansee Sem. Proc.* 1993. V. 13. P. 429.
23. Установки индукционные “Кристалл 603”, “Кристалл 606” и “Кристалл 607” / Москва: Информ-электро. 1986. 6 с.
24. Straumal B.B., Korneva A., Kuzmin A., Lopez G., Rabkin E., Straumal A.B., Gerstein G., Gornakova A.S. // *Metals*. 2021. V. 11. P. 1881.
<https://doi.org/10.3390/met11111881>
25. Straumal B., Khrapova N., Druzhinin A., Tsoy K., Davdian G., Orlov V., Gerstein G., Straumal A. // *Crystals*. 2023. V. 13. P. 1538.
<https://doi.org/10.3390/cryst13111538>
26. Kilmametov A., Gornakova A., Khrapova N., Davdyan G., Kogtenkova O., Khorosheva M., Orlov V., Straumal B. // *Mater. Lett.* 2026. V. 406. P. 139950.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139950>

Wetting of Surface and Grain Boundaries in Tungsten with Melted Nickel

B. B. Straumal^{1,*}, V. M. Kiiko¹, V. G. Sursaeva¹

¹*Osipyan Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, 142432 Russia*

*e-mail: straumal@issp.ac.ru

The paper describes the wetting of polycrystalline and bicrystalline tungsten specimens. A process flow chart is described for wetting solid tungsten with molten nickel in a vacuum at temperatures between 1550–1800°C. The structure of the specimens was studied using scanning electron microscopes equipped with energy-dispersive spectrometers, which allow the identification of chemical elements. The formation of chemical compounds Ni₄W, NiW₂, and nickel–tungsten solid solutions in regions along the initial nickel–tungsten interfaces was established. Decreasing values of the contact angles of wetting tungsten by nickel from ~15° to 4° degrees with increasing temperature in the specified temperature range were determined. Penetration of molten nickel was detected along the interface between single crystals in the tungsten bicrystal, the content of which decreases from the surface of the specimen in a quadratic dependence. The nature of the interaction of polycrystalline and bicrystal tungsten with molten nickel is practically identical. The obtained results can be used in the development of composite materials and alloys, including pseudoalloys, in determining the area of their using, as well as in optimizing the processes of soldering and obtaining nickel-containing coatings on refractory metals.

Keywords: nickel, tungsten, temperature, melt, contact angle, structure, chemical interaction, solid solution, polycrystal, bicrystal, interface.