

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Ti И TiH₂ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АЛМАЗНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

© 2020 г. П.А. Логинов, С. Воротыло, Д.А. Сидоренко, Ю.В. Лопатина,
А. Окубаев, Н.В. Швындина, Е.А. Левашов

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСИС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 27.12.19 г., доработана 09.03.20 г., подписана в печать 11.03.20 г.

Исследовано влияние добавок титана и гидрида титана на структуру, механические свойства и износостойкость медных сплавов, предназначенных для использования в качестве связки алмазного режущего инструмента. Порошковые смеси Cu–Ti и Cu–TiH₂ были получены методом механического легирования в планетарной центробежной мельнице. Такая обработка позволила получить однофазные порошки твердого раствора на основе меди в системе Cu–Ti и двухфазные на основе меди с равномерно распределенными субмикронными частицами TiH₂ в системе Cu–TiH₂. Установлено, что максимальными механическими свойствами характеризуются компактные образцы составов Cu–2,5%Ti и Cu–10%TiH₂ (в 2,0–3,5 раза выше, чем у чистой меди). Упрочнение в этих сплавах реализуется по твердорастворному механизму и благодаря формированию фазы Cu₃Ti₃O. Зерна данной фазы имеют более высокую дисперсность в сплавах, где в качестве титаносодержащей добавки использовался TiH₂, за счет чего достигаются высокие значения предела прочности при изгибе (920 МПа) и твердости (114 НВ). По результатам сравнительных трибологических испытаний установлено, что лучшей износостойкостью обладают образцы состава Cu–10%TiH₂. Приведенный износ данных образцов после испытаний по схеме «стержень–диск» был на порядок меньше, чем у чистой меди, и в 5 раз ниже, чем у образцов Cu–2,5%Ti.

Ключевые слова: алмаз, алмазный инструмент, медные сплавы, механическое легирование, прочность.

Логинов П.А. — канд. техн. наук, науч. сотр. Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСИС–ИСМАН (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru.

Воротыло С. — инженер НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: stepan.vorotylo@gmail.com.

Сидоренко Д.А. — канд. техн. наук, науч. сотр. НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: dsidorenko@inbox.ru.

Лопатина Ю.В. — лаборант НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: jullylop1099@yandex.ru.

Окубаев А. — лаборант НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: mr.aytkanov@mail.ru.

Швындина Н.В. — инженер НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: natali19-03@list.ru.

Левашов Е.А. — докт. техн. наук, проф., акад. РАЕН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ «МИСИС», директор НУЦ СВС МИСИС–ИСМАН. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Для цитирования: Логинов П.А., Воротыло С., Сидоренко Д.А., Лопатина Ю.В., Окубаев А., Швындина Н.В., Левашов Е.А. Влияние добавок Ti и TiH₂ на структуру и свойства медных сплавов для алмазного режущего инструмента. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 3. С. 51–58.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-51-58.

Loginov P.A., Vorotilo S., Sidorenko D.A., Lopatina Yu.V., Okubaev A., Shvyndina N.V., Levashov E.A.

The effect of Ti and TiH₂ additives on structure and mechanical properties of copper alloys for diamond cutting tools

The study covers the effect of titanium and titanium hydride additives on the structure, mechanical properties, and wear resistance of copper alloys to be used as a binder for diamond cutting tools. Cu–Ti and Cu–TiH₂ powder mixtures were obtained by mechanical alloying in a planetary ball mill. This treatment made it possible to obtain single-phase copper-based solid solution powders in the Cu–Ti system and two-phase copper-based powders with uniformly distributed submicron TiH₂ particles in the Cu–TiH₂ system. It was found that Cu–2.5%Ti and Cu–10%TiH₂ compact samples feature by maximum mechanical properties (2.0–3.5 times higher than that of pure copper). Hardening in these alloys is implemented by the solid-solution mechanism and due to the Cu₃Ti₃O phase formation. Grains of this phase have a higher dispersion in alloys with TiH₂ used as a titanium-containing additive. This provides a high value of bending strength (920 MPa) and hardness (114 HB). According to the results of comparative tribological tests, it was found

that Cu–10%TiH₂ samples have the best wear resistance. After pin-on-disk tests, the equivalent wear of these samples was an order of magnitude less than that of pure copper and 5 times lower than that of Cu–2.5%Ti samples.

Keywords: diamond, diamond tool, copper alloys, mechanical alloying, strength.

Loginov P.A. — Cand. Sci. (Tech.), research scientist of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru.

Vorotilo S. — engineer of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: stepan.vorotylo@gmail.com.

Sidorenko D.A. — Cand. Sci. (Tech.), research scientist of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: dsidorenko@inbox.ru.

Lopatina Yu.V. — laboratory assistant of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: jullylop1099@yandex.ru.

Okubayev A. — laboratory assistant of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: mr.aytkanov@mail.ru.

Shvyndina N.V. — engineer of the Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: natali19-03@list.ru.

Levashov E.A. — Dr. Sci. (Tech.), prof., acad. of Russian Academy of Natural Science, chair of the Department of powder metallurgy and functional coatings of National University of Science and Technology «MISIS», head of Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Citation: Loginov P.A., Vorotilo S., Sidorenko D.A., Lopatina Yu.V., Okubaev A., Shvyndina N.V., Levashov E.A. The effect of Ti and TiH₂ additives on structure and mechanical properties of copper alloys for diamond cutting tools. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 3. P. 51–58 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-3-51-58.

Введение

Благодаря высокой теплопроводности, пластичности и доступности, медь широко используется в составе связок алмазного инструмента [1–5]. Чистая медь имеет два существенных недостатка, ограничивающих ее применение в алмазном инструменте, — относительно невысокие механические свойства и отсутствие взаимодействия с углеродом. Последнее является причиной низкой прочности алмазодерживания сверхтвердого материала в рабочем слое инструмента [6, 7]. Поэтому медные связки легируют титаном, хромом, железом, никелем и другими компонентами [8–10].

При производстве алмазного инструмента широко применяются медно-титановые сплавы или титановые бронзы [11, 12]. Легирование медного сплава титаном способствует упрочнению (твердорастворному или за счет выделения интерметаллидов) и улучшает адгезию связки к алмазу. Порошки медно-титановых сплавов, как правило, получают распылением расплавов газом [13, 14]. Однако наряду с высокой производительностью процесс распыления является трудно управляемым. В данной работе для получения порошковых смесей на основе меди предложен метод механического легирования (МЛ) в шаровых планетарных мельницах (ШПМ). Он позволяет получать порошковые материалы с ультрамелкодисперсной и нанокристаллической структурами. При этом ма-

лая взаимная растворимость титана и меди не является критичной, так как с помощью МЛ можно получать порошки пересыщенных твердых растворов и метастабильных фаз [15–17]. Интенсивная пластическая деформация порошков в условиях ШПМ приводит к формированию чередующихся наноразмерных слоевых структур, накоплению большой плотности дефектов кристаллической решетки [18], что позволяет активизировать процессы спекания либо получать готовые изделия с требуемым уровнем пористости при меньших температурах [19]. В совокупности все эти факторы позволяют получать материалы с высокими механическими свойствами.

Данная работа направлена на разработку перспективных экономно легированных медных сплавов. При этом титан вводится в порошковую смесь как в металлическом виде, так и в виде гидрида титана (TiH₂), который имеет ряд преимуществ перед металлическим титаном. Во-первых, TiH₂, в отличие от металлического титана, является хрупким, легко разрушающимся материалом. Интенсивная обработка порошка TiH₂ в ШПМ приводит к его измельчению до субмикронных размеров и равномерному распределению по объему порошка. Во-вторых, TiH₂ является термически нестабильным соединением и распадается на металлический титан и водород при температурах

выше 600—650 °С [20—22]. Выделяющийся водород в процессе нагревания способствует восстановлению оксидных пленок на поверхности порошков, что интенсифицирует усадку при спекании.

Цель работы — исследование процесса МЛ в порошковых смесях систем Cu—Ti и Cu—TiH₂, получение компактных образцов методом горячего прессования (ГП), сравнение структуры, механических свойств, износостойкости и выбор оптимального состава сплава.

Методика эксперимента

Были использованы порошки меди марки ПМС-1 производства АО «Уралэлектромедь» (г. Верхняя Пышма) (средний размер частиц $d = 35$ мкм, содержание примесей $\leq 0,12$ мас.%), титана марки ПТМ производства АО «Полема» (г. Тула) ($d = 40$ мкм, примесей ≤ 1 мас.%), TiH₂ производства ЗАО «Плазмотерм» (г. Москва) ($d = 12$ мкм, примесей $\leq 0,5$ мас.%, получен гидрированием губчатого титана).

Приготовление порошковых смесей проводили в ШПМ «Активатор-2s» (частота вращения барабанов 1388 об/мин, частота вращения водила 694 об/мин, продолжительность обработки 5—15 мин). Для предотвращения окисления шихты в процессе смешивания барабаны заполняли аргоном. Компактные образцы размером 100×100×3 мм были получены методом горячего прессования (ГП) на установке Dr. Fritsch (Германия) в вакууме при температуре 750 °С, давлении 350 кг/см², изотермической выдержке 3 мин. Такой режим горячего прессования, с одной стороны, обеспечивает получение образцов из меди или медных сплавов с минимальной пористостью [23, 24], а с другой — гарантирует механическую и химическую невосприимчивость алмазов [4, 10] и, следовательно, применим в производстве алмазного инструмента. Далее из них вырезали образцы для исследования механических свойств и износостойкости.

Остаточную пористость компактных образцов определяли методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов фирмы A&D (Япония). Предел прочности при изгибе измеряли на универсальной сервогидравлической машине LF-100 (Walter + Bai, Швейцария) с внешним цифровым контроллером (EDC) при использовании программного обеспечения DIONPro.

Твердость по Бринеллю определяли (ГОСТ 9012-59) на автоматизированном универсальном

твердомере DIGI-TESTOR 930 (Wolpert&Wilson Instruments, США) с шаровым индентором из закаленной стали диаметром 5 мм.

Для оценки износостойкости горячепрессованных связок проводили трибологические испытания на полированных образцах с помощью автоматизированной машины трения «Tribometer» фирмы «CSM Instruments» (Швейцария) с использованием вращательного движения по схеме «стержень—пластина». При испытаниях на контртело, которое представляло собой шарик из спеченного оксида алюминия диаметром 6 мм, прикладывали нагрузку 0,5 Н; радиус дорожки — 6,8 мм, максимальная скорость — 10 см/с, пробег — 214 м (5000 циклов). Для оценки приведенного износа проводили съемку профилей дорожек износа на оптическом профилометре «Wyko NT1100» (Veeco, США). Среднее значение приведенного износа образцов определялось по следующей формуле:

$$WR = (S_{\max}/n + S_{\min}/n)l(FS)^{-1}, \quad (1)$$

где WR — приведенный износ; $S_{\max}$, $S_{\min}$ — площадь сечения дорожки износа соответственно в широком и узком месте, мм²; n — количество измерений; l — длина окружности (дорожки износа), мм; F — нагрузка на контртело, Н; S — суммарный пробег, м.

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА) осуществляли на автоматизированном рентгеновском дифрактометре «Bruker D2 Phaser» (США) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения в геометрии Брегга—Брентано. Для обработки рентгенограмм использовали программу «Diffra. EVA» и базу данных «Crystallography Open Database».

Структуру порошковых и компактных материалов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа S-3400N (Hitachi, Япония), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром NORAN.

Результаты и их обсуждение

Обработку в ШПМ порошковой смеси Cu—Ti проводили в течение 5 и 15 мин, затем исследовали структуру и фазовый состав для оценки распределения легирующих компонентов. При этом происходило деформирование исходных частиц меди и титана, их холодное сваривание и формирование композиционных гранул 50—100 мкм, что характерно для системы «пластичное—пластичное». В зависимости от длительности обработки изме-

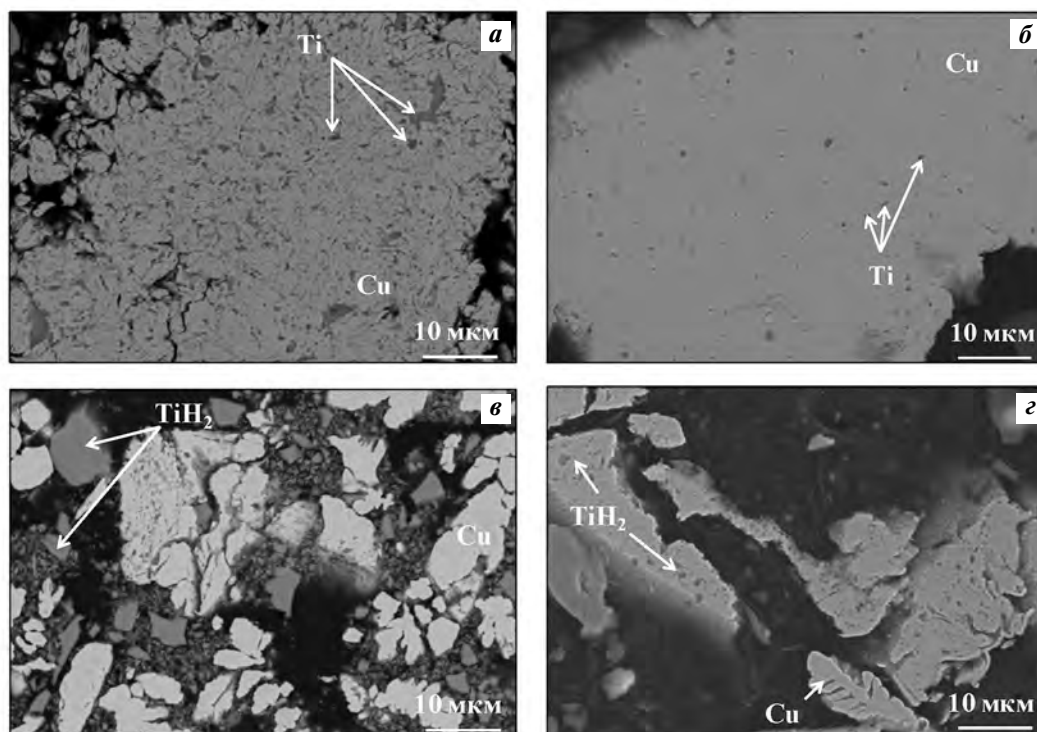


Рис. 1. Структуры порошковых смесей Cu–Ti (*а, б*) и Cu–TiH₂ (*в, г*) после МЛ различной длительности τ , мин: *а, в* – 5; *б, г* – 15

нялись толщина и распределение титановых прослоек в гранулах. После МЛ продолжительностью $\tau = 5$ мин отмечено большое количество равномерно распределенных титановых прослоек толщиной 1–10 мкм (рис. 1, *а*). При $\tau = 15$ мин их количество заметно уменьшилось, гранулы приобрели однородную структуру (рис. 1, *б*). Анализ фазового состава показал, что после такой обработки произошло практически полное растворение титана в медной матрице (рис. 2, *а*).

Структурообразование при МЛ смесей Cu–TiH₂ имеет свои особенности, связанные с физико-механическими свойствами гидрида титана. В отличие от титана данное соединение является твердым и хрупким, легко разрушается при контакте с размольными телами в ШПМ. После МЛ в течение 5 мин TiH₂ измельчался и частично вдавливался в медную матрицу, а частично сохранялся в виде самостоятельных частиц размером 10 мкм. При времени обработки 15 мин весь TiH₂ был представлен субмикронными частицами, расположенными между деформированными слоями меди. Методом РФА установлено, что в этом случае TiH₂ не претерпевает фазовых превращений и не растворяется в меди (рис. 2). Таким образом, при обработке в ШПМ порошковых смесей Cu–Ti и Cu–TiH₂ с

продолжительностью 15 мин были получены композиционные гранулы с равномерным распределением легирующего компонента. Данный режим был выбран для наработки смесей для последующего горячего прессования (ГП).

Для определения оптимальной концентрации и типа легирующей добавки методом ГП была изготовлена серия образцов Cu–*X*Ti и Cu–*X*TiH₂ (где *X* = 2,5÷15,0 мас.%). Их механические свойства сравнивали между собой, а также со свойствами чистой меди. Положительный эффект от введения титана проявляется только при его концентрации 2,5 мас.% (см. таблицу). Образцы Cu–2,5%Ti характеризовались пределом прочности при изгибе 470 МПа, что почти в 2 раза выше, чем у чистой меди, и на 20 % более высокой твердостью. Повышение концентрации титана приводило к существенному снижению прочности образцов. В структуре образцов Cu–2,5%Ti присутствовали две фазы — медная матрица и зерна титансодержащей фазы вытянутой формы (рис. 3, *а*). Данная фаза была определена методом РФА как Cu₃Ti₃O с ГЦК-решеткой и периодом $a = 11,269 \text{ \AA}$ (рис. 4). Вероятно, образование фазы Cu₃Ti₃O произошло в результате растворения кислорода в титане во время обработки порошковых смесей в ШПМ (кисло-

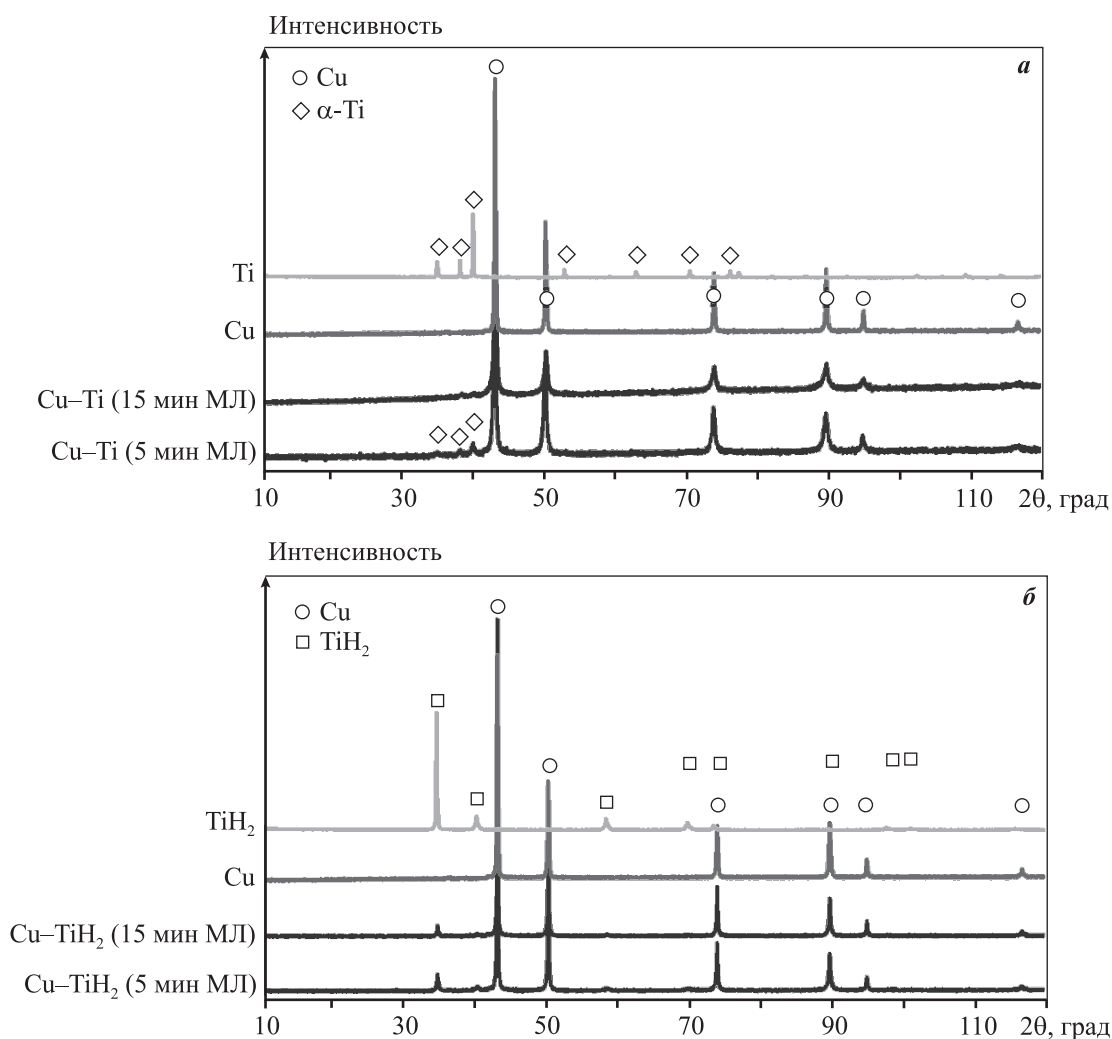


Рис. 2. Рентгенограммы исходных порошков и смесей Cu–Ti (а) и Cu–TiH₂ (б) после МЛ различной длительности

Физико-механические свойства ГП-образцов Cu–XTi и Cu–XTiH₂

X, %	Пористость, %	$\sigma_{изг}$ МПа	Твердость, НВ
Cu–XTi			
0	2,0	250 ± 40	47 ± 1
2,5	5,5	470 ± 30	57 ± 1
5,0	7,8	280 ± 20	68 ± 1
10,0	8,8	180 ± 20	119 ± 1
15,0	10,5	160 ± 10	138 ± 1
Cu–XTiH ₂			
2,5	5,2	340 ± 20	66 ± 1
5,0	5,4	540 ± 30	91 ± 2
10,0	6,5	920 ± 80	114 ± 1
15,0	6,8	670 ± 100	129 ± 2

род присутствовал в аргоне в качестве примеси) и затем при его взаимодействии с медью в процессе горячего прессования. С ростом содержания титана количество фаз интерметаллидов увеличивалось. Помимо фазы Cu₃Ti₃O в образцах обнаружены интерметаллид Cu₃Ti и остаточный титан (рис. 3, б, рис. 4). Эти фазы выделялись по границам зерен медной матрицы, что привело к охрупчиванию материала.

Зависимость предела прочности при изгибе от содержания TiH₂ имеет экстремальный характер с максимумом при 10 % TiH₂. Прочность данного состава превышает 900 МПа, твердость составляет 114 НВ, что значительно больше, чем у чистой меди. Образцы Cu–10%TiH₂ являются двухфазными, как и в ГП-образцах Cu–Ti в них присутствует фаза Cu₃Ti₃O. Однако зерна этой фазы меньше размером и равномерно распределены в

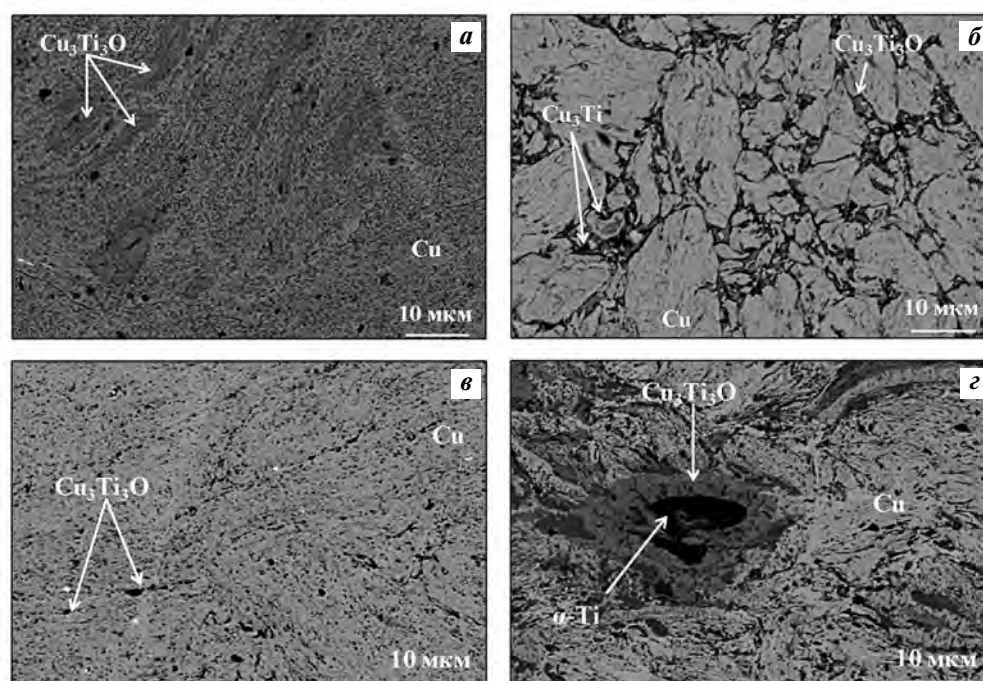


Рис. 3. Структура ГП-образцов Cu–Ti (*а, б*) и Cu–TiH₂ (*в, г*)
X, %: *а* – 2,5; *б, в* – 10; *г* – 15

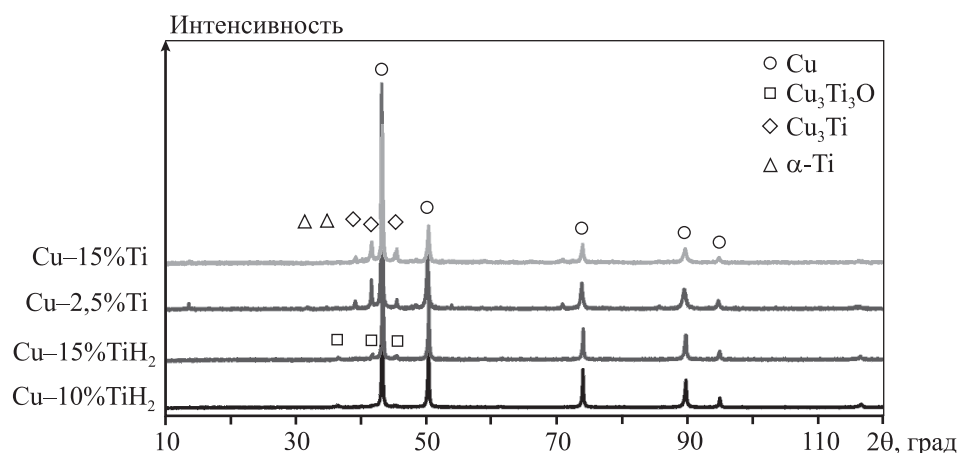


Рис. 4. Рентгенограммы ГП-образцов Cu–Ti и Cu–TiH₂

материале (рис. 3, *в*), благодаря чему достигаются высокие механические свойства. При увеличении концентрации TiH₂ происходит частичная агломерация зерен фазы Cu₃Ti₃O, что приводит к охрупчиванию.

Таким образом, найдены оптимальные режимы приготовления смесей и количество легирующих добавок — титана и его гидроксида. Из образцов Cu–2,5%Ti и Cu–10%TiH₂ были изготовлены компактные образцы для проведения трибологических испытаний. В качестве образца сравнения использовали горячепрессованный образец чистой

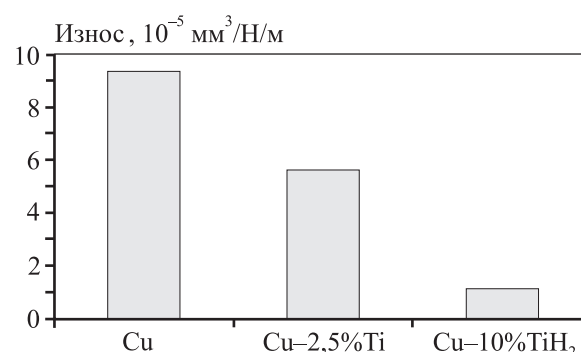


Рис. 5. Значения приведенного износа ГП-образцов меди, Cu–2,5%Ti и Cu– 10%TiH₂

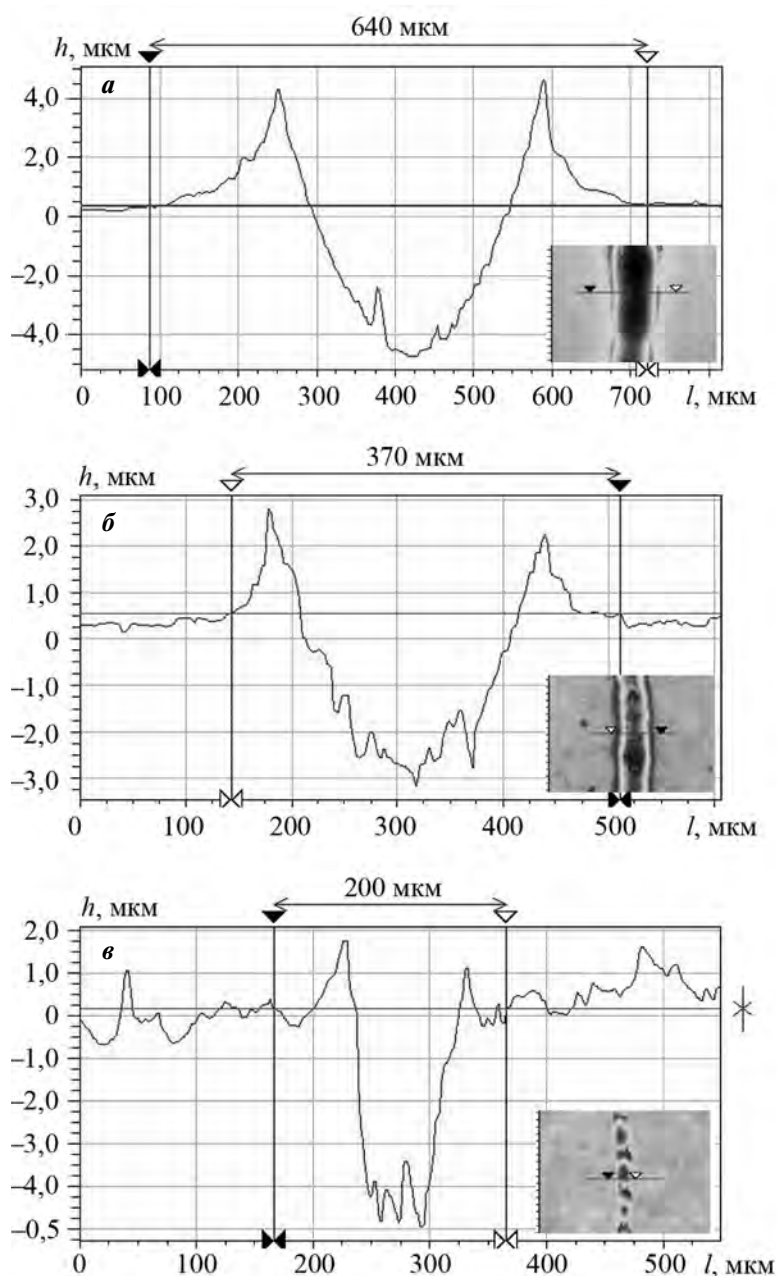


Рис. 6. 2D-профили дорожек износа после трибологических испытаний ГП-образцов меди (а), Cu—2,5%Ti (б) и Cu—10%TiH₂ (в)

меди. По износостойкости образец Cu—10%TiH₂ на порядок превосходил чистую медь и в 5 раз — образец, легированный металлическим титаном (рис. 5). Анализ профилограмм дорожек износа показал, что во всех случаях в процессе испытаний происходят периодическое продавливание контртелом поверхности образцов и проскальзывание после деформационного упрочнения. Износ образца Cu—10%TiH₂ был минимальным благодаря высокой твердости (в 2 раза выше, чем у меди и

образца Cu—2,5%Ti), а также равномерному распределению частиц упрочняющей фазы Cu₃Ti₃O, препятствующей развитию пластической деформации приповерхностных участков.

Выводы

1. Исследованы процессы структурообразования в порошковых смесях Cu—Ti и Cu—TiH₂ при механическом легировании. Установлено, что в процессе обработки смесей в ШПМ в течение 15 мин титан полностью растворяется в медной матрице, а TiH₂ измельчается до субмикронных размеров, равномерно распределяясь по объему матрицы и не претерпевая химических превращений.

2. Лучшим сочетанием механических свойств обладают образцы состава Cu—10%TiH₂, полученные горячим прессованием. Они характеризуются пределом прочности при изгибе 920 МПа и твердостью 114 НВ (соответственно в 3,7 и 2,4 раза выше, чем у чистой меди соответственно). Высокий уровень механических свойств обусловлен равномерным распределением упрочняющей титансодержащей фазы Cu₃Ti₃O.

3. Износостойкость образцов Cu—10%TiH₂ оказалась в 10 раз выше, чем у чистой меди, и в 5 раз больше, чем у образцов Cu—2,5%Ti. Высокий уровень механических свойств и износостойкости состава Cu—10%TiH₂ делает его перспективным для использования в качестве связки для алмазного режущего инструмента.

Работа выполнена за счет гранта

Российского научного фонда (проект № 17-79-20384).

Литература/References

1. Zhang Z.-Y., Xiao B., Duan D.-Z., Wang B., Liu S.-X. Investigation on the brazing mechanism and machining performance of diamond wire saw based on Cu—Sn—Ti alloy. *Int. J. Refract. Met. H.* 2017. Vol. 66. P. 211—219.
2. Soltani H.M., Tayebi M. Determination of wear parameters and mechanisms of diamond/copper tools in marb-

- le stones cutting. *Int. J. Refract. Met. H.* 2020. Vol. 87. No. 105172.
3. Polushin N.I., Bogatyrev A.V., Laptev A.I., Sorokin M.N. Influence of the matrix composition, structure, and properties on the service life of a diamond drilling tool. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. Iss. 2. P. 174–179.
 4. Sharin P.P., Akimova M.P., Popov V.I. Correlation of the diamond/matrix interphase zone structure with tool efficiency obtained by technology combining metallization of diamonds with matrix sintering. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 1348–1356.
 5. Loginov P.A., Levashov E.A., Kurbatkina V.V., Zaitsev A.A., Sidorenko D.A. Evolution of the microstructure of Cu–Fe–Co–Ni powder mixtures upon mechanical alloying. *Powder Technol.* 2015. Vol. 276. P. 166–174.
 6. Tillmann W., Ferreira M., Steffen A., Rüster K., Möller J., Bieder S., Paulus M., Tolan M. Carbon reactivity of binder metals in diamond–metal composites — characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. *Diam. Relat. Mater.* 2013. Vol. 38. P. 118–123.
 7. Qiu W.Q., Liu Z.W., He L.X., Zeng D.C., Mai Y.-W. Improved interfacial adhesion between diamond film and copper substrate using a Cu(Cr)—diamond composite interlayer. *Mater. Lett.* 2012. Vol. 81. P. 155–157.
 8. Vorotilo S., Loginov P., Mishnaevsky L., Sidorenko D., Levashov E. Nanoengineering of metallic alloys for machining tools: Multiscale computational and in situ TEM investigation of mechanisms. *Mat. Sci. Eng. A.* 2019. Vol. 739. P. 480–490.
 9. Sokolov E.G., Ozolin A.V. The influence of temperature on interaction of Sn–Cu–Co–W binders with diamond in sintering the diamond-containing composite materials. *Mater. Today Proc.* 2018. Vol. 5. Iss. 12. Pt. 3. P. 26038–26041.
 10. Loginov P.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A., Lopatin V. Yu., Zaitsev A.A., Sidorenko D.A., Rupasov S.I. Peculiarities of the influence of nanomodification on the properties of the Cu–Fe–Co–Ni binder for a diamond tool. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 5. P. 567–574.
 11. Huang S.-F., Tsai H.-L., Lin S.-T. Effects of brazing route and brazing alloy on the interfacial structure between diamond and bonding matrix. *Mater. Chem. Phys.* 2004. Vol. 84. Iss. 2–3. P. 251–258.
 12. Li X., Ivas T., Spierings A.B., Wegener K., Leinenbach C. Phase and microstructure formation in rapidly solidified Cu–Sn and Cu–Sn–Ti alloys. *J. Alloys Compd.* 2018. Vol. 735. P. 1374–1382.
 13. Gan J., Gao H., Wen S., Zhou Y., Tan S., Duan L. Simulation, forming process and mechanical property of Cu–Sn–Ti/diamond composites fabricated by selective laser melting. *Int. J. Refract. Met. H.* 2020. Vol. 87. No. 105144.
 14. Malzahn Kampe J.C., Cooper K.P., Ayers J.D. Deformation processed composite wires from gas-atomized Cu–Cr–Ag powder. *Scr. Metall. Mater.* 1990. Vol. 24. Iss. 9. P. 1783–1788.
 15. Manakova O.S., Kurbatkina V.V., Levashov E.A. Structure and properties of the precipitation-hardening Ti–Nb–C material with a binder. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 4. P. 486–491.
 16. Kuskov K.V., Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Shkodich N.F., Rouvimov S., Shchukin A.S., Illarionova E.V., Kudryashov V.A., Mukasyan A.S. Resistance of microcrystalline and nanocrystalline Cu/Cr pseudo-alloys to vacuum discharge. *J. Alloys Compd.* 2018. Vol. 750. P. 811–818.
 17. Rogachev A.S., Kuskov K.V., Shkodich N.F., Moskovskikh D.O., Orlov A.O., Usenko A.A., Karpov A.V., Kovalev I.D., Mukasyan A.S. Influence of high-energy ball milling on electrical resistance of Cu and Cu/Cr nanocomposite materials produced by Spark Plasma Sintering. *J. Alloys Compd.* 2016. Vol. 688. Pt. A. P. 468–474.
 18. Annenkov M., Blank V., Kulnitskiy B., Larionov K., Ovsyannikov D., Perezhogin I., Popov M., Sorokin P. Boron carbide nanoparticles for high-hardness ceramics: Crystal lattice defects after treatment in a planetary ball mill. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2017. Vol. 37. Iss. 4. P. 1349–1353.
 19. Shkodich N.F., Spasova M., Farle M., Kovalev D.Yu., Nepapushev A.A., Kuskov K.V., Vergunova Yu.S., Scheck Yu.B., Rogachev A.S. Structural evolution and magnetic properties of high-entropy CuCrFeTiNi alloys prepared by high-energy ball milling and spark plasma sintering. *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 816. No. 152611.
 20. Loginov P.A., Sidorenko D.A., Shvyndina N.V., Sviridova T.A., Churyumov A.Yu., Levashov E.A. Effect of Ti and TiH₂ doping on mechanical and adhesive properties of Fe–Co–Ni binder to diamond in cutting tools. *Int. J. Refract. Met. H.* 2019. Vol. 79. P. 69–78.
 21. Jiménez C., Garcia-Moreno F., Rack A., Tucoulou R., Klaus M., Pfretzschner B., Rack T., Cloetens P., Banhart J. Partial decomposition of TiH₂ studied in situ by energy-dispersive diffraction and ex situ by diffraction microtomography of hard X-ray synchrotron radiation. *Scr. Mater.* 2012. Vol. 66. Iss. 10. P. 757–760.
 22. Jiménez C., Garcia-Moreno F., Pfretzschner B., Klaus M., Wollgarten M., Zizak I., Schumacher G., Tovar M., Banhart J. Decomposition of TiH₂ studied in situ by synchrotron X-ray and neutron diffraction. *Acta Mater.* 2011. Vol. 59. Iss. 16. P. 6318–6330.
 23. Luo X., Yang Y.Q., Liu Y.C., Ma Z.J., Yuan M.N., Chen Y. The fabrication and property of SiC fiber reinforced copper matrix composites. *Mat. Sci. Eng. A.* 2007. Vol. 459. Iss. 1–2. P. 244–250.
 24. Salvo C., Mangalaraja R.V., Udayabashkar R., Lopez M., Aguilar C. Enhanced mechanical and electrical properties of novel graphene reinforced copper matrix composites. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 777. P. 309–316.