

УДК 621.791.927.5,666.798.2

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ СВС-ЭЛЕКТРОДАМИ СТИМ-2/30 И ПРОМЫШЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ Т-590

© 2023 г. А. О. Жидович<sup>1</sup>, \*, О. А. Аверичев<sup>1</sup>, А. С. Иванов<sup>1</sup>, С. В. Карпов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, ул. Академика Осипяна, 8, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

<sup>2</sup>Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106/5, Тамбов, 392000 Россия

\*e-mail: a10012012@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023 г.

После доработки 31.08.2023 г.

Принята к публикации 01.09.2023 г.

Промышленные электроды для износостойкой наплавки Т-590 и электроды с упрочняющими частицами карбида титана СТИМ-2/30, полученные методом СВС-экструзии, применялись для создания защитных слоев на поверхности стали методом электродуговой наплавки. Исследованы фазовый состав и структура наплавленных покрытий. Установлено, что структура покрытий, наплавленных электродами Т-590, представлена карбидной эвтектикой. Показано, что упрочняющая фаза СВС-электродов TiC переходит в наплавленный слой и распределяется по всей высоте наплавки, а в области сплавления покрытия с подложкой формируется промежуточный диффузионный слой. Наплавленные покрытия имеют твердость и микротвердость в 2–4 раза выше в сравнении со стальной подложкой. Наплавка электродами Т-590 обеспечивает более высокие значения твердости наплавленных слоев, однако увеличение содержания феррита в их структуре может привести к снижению износостойкости. В покрытиях, наплавленных СВС-электродами, формируется благоприятная структура, способная обеспечить высокое сопротивление абразивному изнашиванию.

**Ключевые слова:** электродуговая наплавка, СВС-электрод, карбид титана, композиционное покрытие, микроструктура

**DOI:** 10.31857/S0002337X23100147, **EDN:** CCLMZW

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и качество обработки почвы в большой степени зависят от состояния рабочих органов почвообрабатывающих машин. Основной причиной снижения ресурса рабочих органов сельскохозяйственной техники является их износ, вызванный воздействием на них твердых частиц почвы [1, 2]. При эксплуатации такого оборудования интенсивному износу подвержены небольшие участки, на которые абразивные массы оказывают повышенное давление. В результате потери на износ составляют небольшую долю объема материала по сравнению с объемом всей детали. При этом затраты на запасные части составляют до 50–80% стоимости ремонта почвообрабатывающих орудий. Эти затраты можно снизить, повысив долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин. В 56% случаях при решении этой проблемы отдают предпочтение упрочнению рабочих органов путем нанесения износостойких покрытий вдоль наиболее изнашиваемых поверхностей

[3]. Одним из методов нанесения покрытий является доступный и широко распространенный метод электродуговой наплавки [4].

Для увеличения износостойкости поверхностей рабочих органов, подверженных абразивному изнашиванию, традиционно используют стеллиты и сормаиты [5, 6]. Повышение сопротивления износу обеспечивается формированием в наплавленном слое твердых карбидных фаз. Обычно при наплавке классическими электродами сталкиваются с проблемой фракционирования твердой карбидной фазы в металлических смесях, ее всплытия и удаления в шлак [7].

Современным методом получения электродов для износостойкой наплавки является метод, сочетающий самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) с высокотемпературным сдвиговым деформированием – СВС-экструзия. СВС-экструзия позволяет напрямую получать в одну технологическую стадию тугоплавкие материалы в виде наплавочных СВС-электродов [8, 9].

Преимуществом СВС-электродов является их однородная структура, формированию которой способствует то, что синтез тугоплавкой фазы осуществляется непосредственно в матрице. Показано [10], что электродуговая наплавка СВС-электродами позволяет увеличить износостойкость поверхности в 1.7–2 раза.

Цель настоящей работы – сравнительное исследование структурных особенностей покрытий, сформированных промышленными электродами для износостойкой наплавки и СВС-электродами группы СТИМ с износостойкой составляющей карбида титана с кобальтовой связкой на поверхности стальных подложек электродуговым способом.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве перспективного материала для создания износостойких покрытий использовали наплавочные СВС-электроды СТИМ-2/30 состава 70% TiC + 30% Co, полученные методом СВС-экструзии. Диаметр СВС-электродов составил 4 мм, длина – 100–150 мм. В работе [10] сообщалось, что микроструктура СВС-электродов представлена твердыми сфероподобными частицами карбида титана TiC, расположенными в вязкой кобальтовой матрице. Твердость СВС-электродов – 55–60 HRC. В качестве промышленных электродов для сравнения были выбраны широко распространенные коммерчески доступные наплавочные электроды марки Т-590 (“Спецэлектрод”). Химический состав наплавленного такими электродами металла следующий (мас. %): 22–27 Cr, 2–2.5 Si, 2.9–3.5 C, 1–1.5 Mn, 0.5–1.5 V.

Покрытия наносились при помощи инвертора “Барс” Profi ARC 317 D на стальные пластины марки СтЗпс толщиной 16 мм. Наплавленный слой формировался за один проход. Нанесение защитных покрытий промышленными электродами марки Т-590 осуществлялось методом ручной электродуговой наплавки. Сила сварочного тока составляла 200–220 А, напряжение – 22–30 В, скорость наплавки – 5–8 мм/с. Наплавка СВС-электродами осуществлялась в среде аргона с расходом защитного газа 6–8 л/мин при токе 180–200 А, напряжении 24–28 В и скорости наплавки 5–8 мм/с. Наплавленные покрытия имели толщину 3–4 мм.

Микроструктура наплавленных покрытий исследовалась на нетравленных шлифах с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Carl Zeiss Ultraplus, оснащенного рентгеноспектральным микроанализатором для проведения энергодисперсионного анализа (ЭДА). Полученные изображения микроструктуры использовались для

определения размера структурных составляющих методом случайных секущих.

Рентгенофазовый анализ (РФА) наплавленных покрытий проводился с помощью автоматического рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М на излучении Fe $\alpha$ . Для анализа покрытия предварительно измельчались до порошкового состояния с размером частиц менее 160 мкм. Съемка осуществлялась на углах 2 $\theta$ , лежащих в интервале от 40° до 100°.

Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера ПМТ-3. Величина нагрузки составляла 1 Н при времени выдержки 10 с. Твердость покрытия определяли при помощи твердомера ТН 500–01 методом Виккерса (HV10/30).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Покрытия, наплавленные электродами Т-590.** Фазовый состав покрытий, наплавленных промышленными электродами марки Т-590, включает остаточный аустенит  $\gamma$ -Fe, феррит  $\alpha$ -Fe, сложный карбид Fe $_{14}$ Cr $_2$ C, а также FeCr (рис. 1). Покрытия также легированы некарбидообразующими элементами (Si, V), которые растворяются в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -Fe. В свою очередь карбидообразующие Cr, Mn и Ti частично входят в состав карбидов, частично находятся в твердом растворе аустенита и феррита. В покрытиях, наплавленных электродами марки Т-590, количество феррита превышает остаточный аустенит. Аустенит оказывает положительное влияние на износостойкость. В процессе изнашивания под воздействием абразивных частиц он претерпевает деформацию и переходит в мартенсит, который обладает высокой твердостью. Феррит, напротив, обладает низкой твердостью и прочностью в сравнении с аустенитом, из-за чего хуже сопротивляется разрушению абразивными частицами, а износостойкие частицы легко выкрашиваются из ферритной матрицы. Эти факторы отрицательно влияют на способность материала сопротивляться абразивному изнашиванию.

Для микроструктуры наплавленных покрытий (рис. 2а, 2б) характерно отчетливое эвтектическое строение: чередование фазы железа (светлая) и карбида Fe $_{14}$ Cr $_2$ C (серый). Поскольку кристаллизация происходит в условиях неоднородности химического состава по толщине наплавки вследствие разбавления ее основным материалом, формируется трехзонная структура. В структуре зоны 1 в эвтектической матрице наблюдаются крупные дендриты железа размером до 80 мкм. Структура зоны 2 имеет аналогичное строение, однако дендриты железа достигают 200 мкм и имеют более тонкое строение. Общая ширина зон 1 и 2 составляет 360 мкм. Ос-

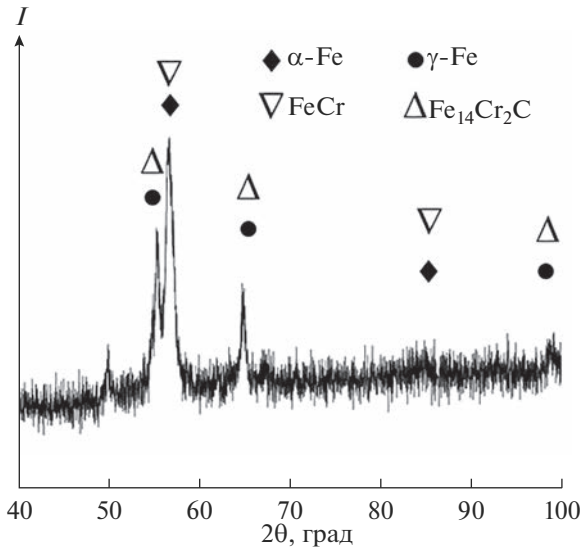


Рис. 1. Дифрактограмма покрытий, наплавленных промышленными электродами Т-590.

новой слой наплавки представлен эвтектическими колониями  $\alpha(\gamma)\text{-Fe} + \text{Fe}_{14}\text{Cr}_2\text{C}$  зоны 3 (рис. 2б). Длина эвтектических карбидов составляет 5–10 мкм, ширина – 0.2–0.8 мкм. Расстояние между карбидами в эвтектике составляет от 0.2 до 1.4 мкм.

В структуре также встречаются немногочисленные первичные карбиды размером 6–11 мкм. Согласно картам распределения элементов (рис. 2в–2д), хром в подложку не диффундирует. Разбавление наплавленного материала железом подложки уменьшается в ряду зона 1–зона 2–зона 3.

Значения твердости, измеренные по методу Виккерса, для наплавленных покрытий составили *HV*10/30 855. Наплавленные покрытия обладают повышенной микротвердостью по всей толщине по отношению к стальной подложке (1.5–1.8 ГПа). Карбиды характеризуются высокой микротвердостью 10–12 ГПа, значения микротвердости эвтектических колоний составляют 7.5–8.7 ГПа.

Принято считать, что для материалов, обладающих высокой твердостью, характерна высокая износостойкость. Однако сопротивление материала изнашиванию зависит от ряда факторов, среди которых важное значение имеет микроструктура наплавленного слоя. В случае покрытий, наплавленных электродами Т-590, износостойкость может быть снижена по причине высокого содержания феррита.

**Покрытия, наплавленные СВС-электродами СТИМ-2/30.** В процессе наплавки под действием температуры в области дуги материал подложки

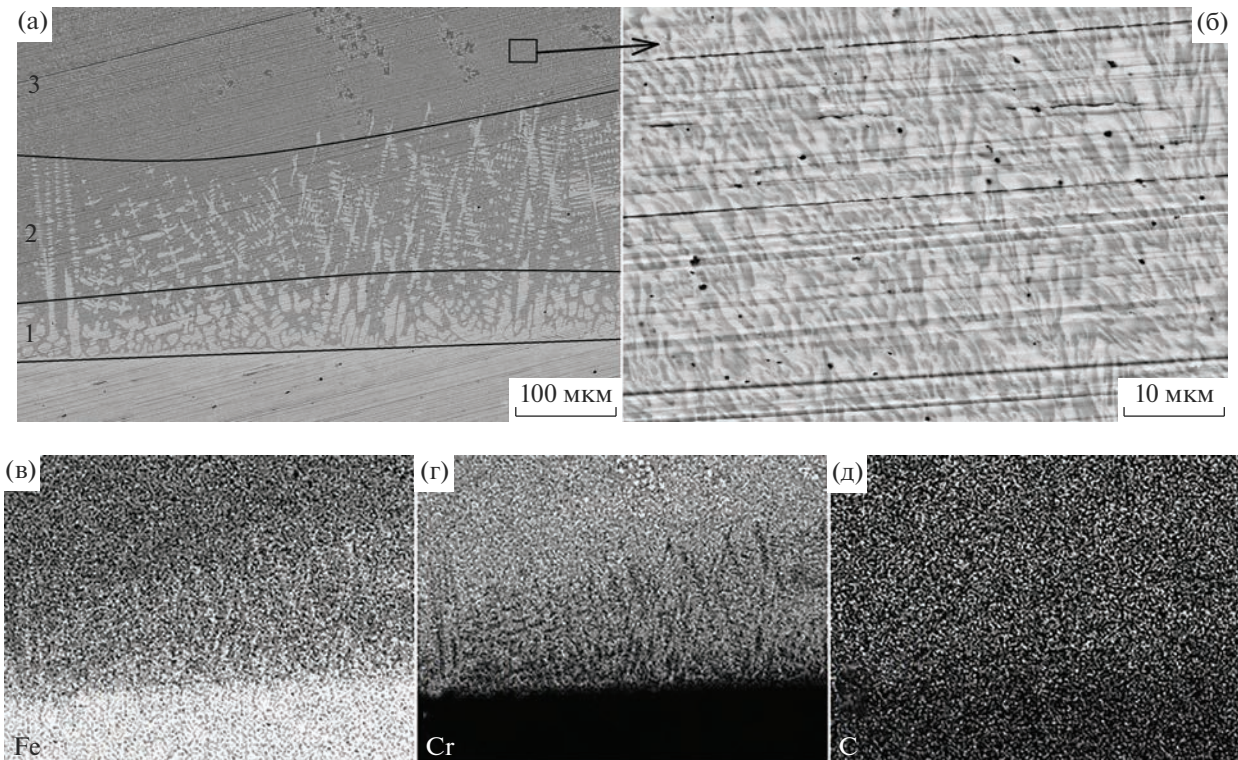


Рис. 2. Микроструктура покрытий, наплавленных электродами марки Т-590 (а, б) и распределение элементов (Fe, Cr, C) в зоне сплавления покрытия с материалом подложки (в–д).

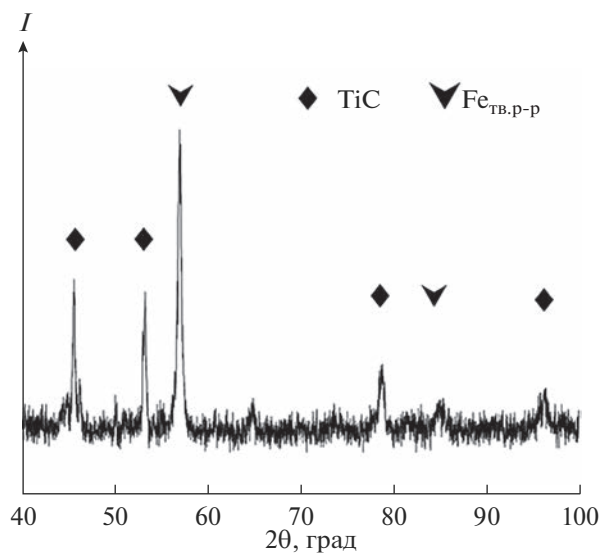
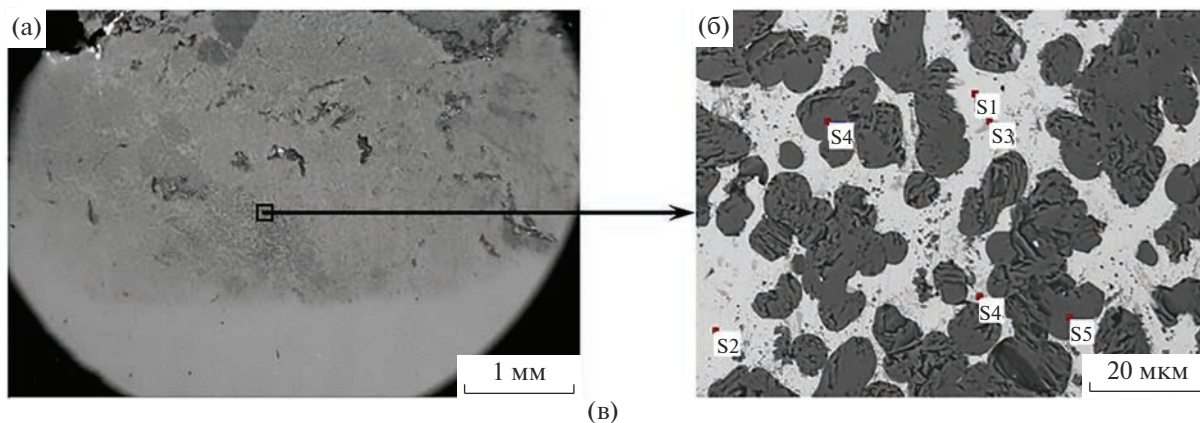


Рис. 3. Дифрактограмма покрытий, наплавленных СВС-электродами СТИМ-2/30.

частично расплавляется, перемешиваясь с материалом наплаваемого СВС-электрода. Это приводит к образованию твердых растворов и формированию новых фаз. В связи с этим наплавленные покрытия обладают сложным фазовым составом. Согласно результатам РФА (рис. 3), в наплавлен-

ных СВС-электродами покрытиях можно выделить две основные фазы: карбид титана TiC и твердый раствор на основе низкотемпературной кубической модификации железа  $Fe_{тв.р-р}$ . Для наплавленных покрытий характерна структура композиционного материала (рис. 4а), в которой упрочняющая фаза карбида титана TiC (темно-серые частицы) удерживается пластичной матрицей. Кобальт хорошо растворяется в  $\alpha$ -Fe (до 80 мас. %). Учитывая результаты РФА и ЭДА, можно сделать вывод, что матрица наплавленных слоев представляет собой высоколегированный (до 55 мас. % Co) феррит (рис. 4в). При этом разбавление материала СВС-электродов материалом подложки в покрытии не превышает 35–40%. Так как в СВС-электродах содержание твердой и хрупкой упрочняющей фазы TiC составляет 70%, данное разбавление оказывает положительное влияние на ударную вязкость наплавленного материала. Это в свою очередь благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках покрытий, т.к. наряду с высоким абразивным износом рабочие органы сельскохозяйственной техники подвергаются ударным нагрузкам.

Частицы карбида титана в покрытиях имеют различную морфологию. В наплавленных слоях доля частиц TiC, имеющих форму многогранни-



Спектр	C	Ti	Fe	Co
S1	7.45	2.86	33.81	55.88
S2	6.68	2.37	35.91	55.04
S3	3.47	28.88	15.25	52.40
S4	6.68	33.05	11.55	48.72
S5	23.19	76.81	—	—
S6	22.37	77.63	—	—

Рис. 4. Характерная микроструктура (а, б) и результаты рентгеноспектрального анализа покрытий (в), наплавленных СВС-электродами СТИМ-2/30.

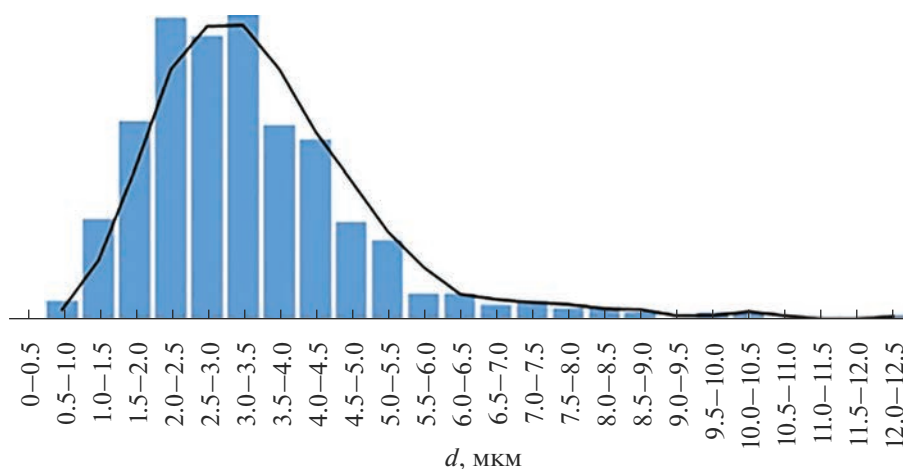


Рис. 5. Распределение размера частиц карбида титана по размеру в наплавленных покрытиях.

ков, не превышает 10–15%. Преимущественно карбид титана имеет глобулярную форму. В СВС-электродах упрочняющие частицы находятся в окружении кобальтовой матрицы, что защищает их от непосредственного воздействия высоких температур сварочной дуги. Мы полагаем, что, несмотря на высокую температуру в области дуги, округлые частицы TiC ( $t_{пл} = 3260^\circ\text{C}$ ) переносятся в покрытия из наплаваемых СВС-электродов, не претерпевая фазовых превращений в процессе наплавки. Таким образом, перенос упрочняющей фазы TiC на стальную поверхность подложки осуществляется за счет плавления матрицы Co ( $t_{пл} = 1495^\circ\text{C}$ ).

Основная доля частиц карбида титана имеет размер 2–3.5 мкм (рис. 5). Под действием высокой температуры в процессе наплавки и последующего охлаждения происходит агломерация частиц карбида титана вплоть до размера 25–50 мкм. Такие скопления упрочняющей фазы обычно обладают пониженной устойчивостью к истиранию ввиду своей хрупкости и выкрашиванию в процессе изнашивания. Также в процессе охлаждения происходит коагуляция частиц TiC. В результате они образуют дендриты, вытянутые вдоль направления теплоотвода, в отдельных случаях их размер достигает 150–200 мкм. В пространстве между частицами формируется эвтектика системы Co–Ti–Fe (рис. 6). Чем темнее цвет пластин, тем больше в них содержится титана и меньше железа. Размер серых эвтектических пластин составляет 1.2–2.6 мкм в длину и 0.1–0.2 мкм в ширину, расстояние между ними – 0.1–0.25 мкм.

Граница сплавления покрытия с подложкой (рис. 7) характеризуется достаточной сплошностью. Структура покрытий на границе представ-

лена вытянутыми вдоль направления теплового потока дендритными зернами феррита и расположенными по границам дисперсными включениями TiC. По сравнению с титаном кобальт в большей степени диффундирует в стальную подложку. Образование промежуточного диффузионного слоя способствует формированию покрытий с высокими адгезионными характеристиками и повышению их стойкости.

На уровень значений микротвердости композиционных покрытий оказывают влияние два разнонаправленно действующих фактора: содержание упрочняющей фазы и дисперсность ее включений. Увеличение содержания упрочняющей фазы приводит к увеличению микротвердости. В то же время уменьшение дисперсности включений приводит к противоположному результату, т.е. микротвердость уменьшается. При совместном действии описанных факторов покрытия, наплав-

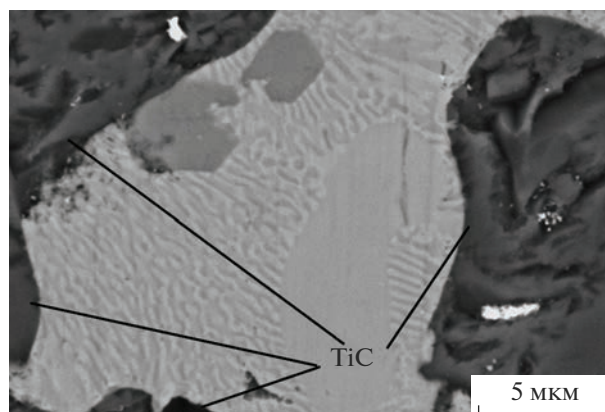


Рис. 6. Эвтектика в пространстве между частицами TiC.

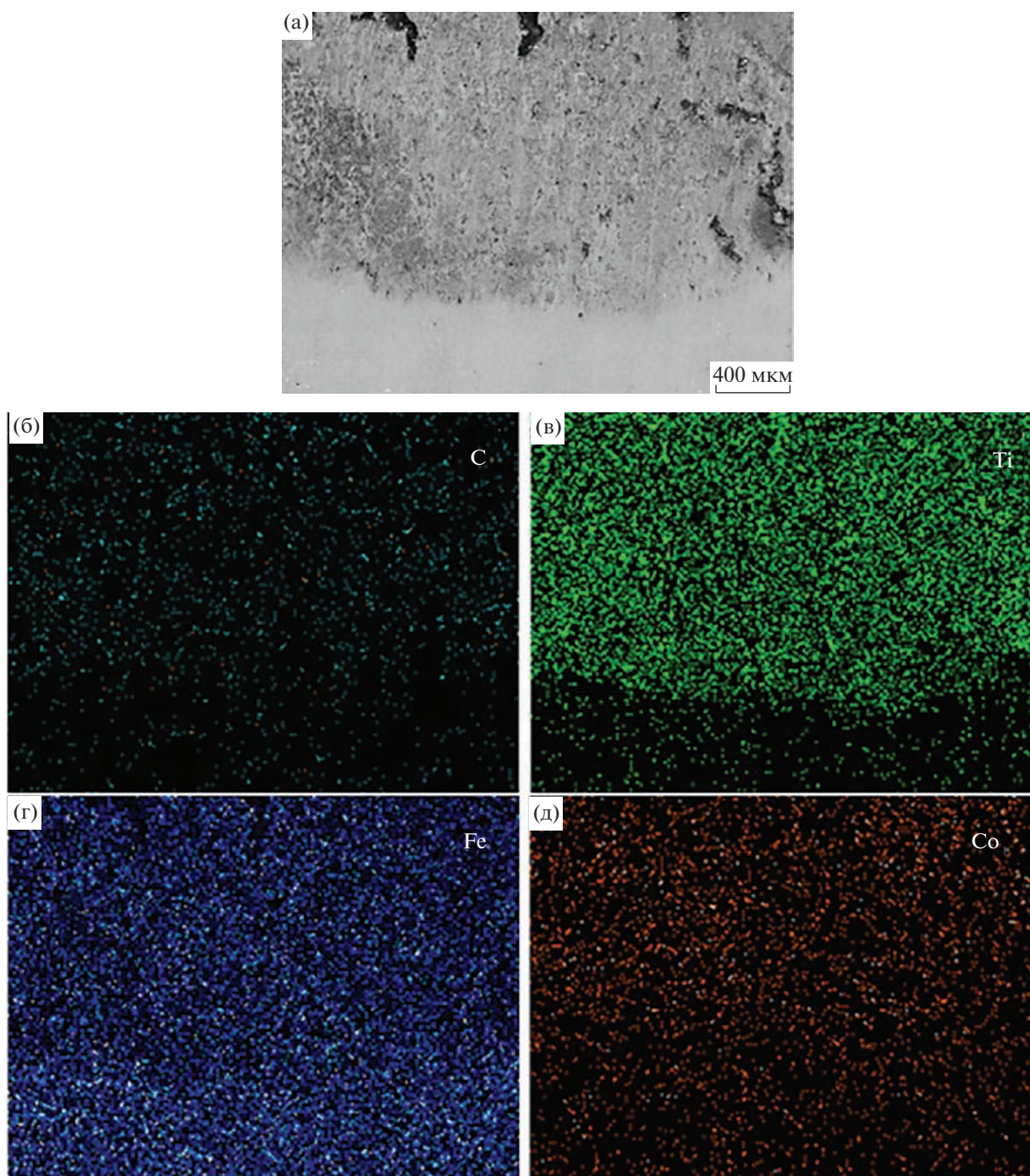


Рис. 7. Распределение элементов (C, Ti, Fe, Co) в зоне сплавления покрытия с материалом подложки.

ленные СВС-электродами СТИМ-2/30, имеют микротвердость 4–6 ГПа. Эти значения микротвердости упрочненной поверхности сохраняются по всей высоте наплавки. При достижении стальной подложки наблюдается резкое снижение микротвердости — в 2–3 раза. Микротвердость частиц карбида титана в покрытии состав-

ляет 22 ГПа (рис. 8). Твердость по Виккерсу наплавленных слоев составила  $HV_{10/30}$  280–425. Для скоплений частиц твердого карбида титана характерна твердость  $HV_{10/30}$  950.

В покрытиях, наплавленных СВС-электродами СТИМ-2/30, присутствие феррита оказывает меньшее негативное влияние на износостой-

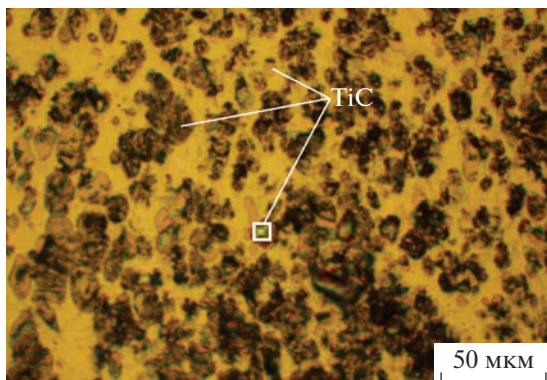


Рис. 8. Отпечаток индентора (белый квадрат) при падении в карбид титана.

кость, поскольку  $\alpha$ -Fe сильно легировано кобальтом, который обладает высокой износостойкостью и повышает твердость и прочность феррита. При этом такие факторы, как равномерное распределение частиц твердого карбида титана в покрытиях и формирование промежуточного диффузионного слоя, положительно сказываются на способности материала сопротивляться абразивному изнашиванию и долговечности покрытий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В покрытиях, наплавленных промышленными электродами Т-590 и СВС-электродами СТИМ-2/30 формируется структура различного типа. В первом случае это карбидная эвтектика с характерным размером структурных составляющих 5–10 мкм и расстоянием между ними 0,2–1,4 мкм. Во втором – композиционная структура с преобладающим размером упрочняющих карбидов TiC до 3,5 мкм. Такие частицы способны эффективно передавать часть напряжений на металлическую основу не разрушаясь. Твердость покрытий, наплавленных электродами Т-590, составляет HV10/30 855, но высокое содержание феррита может привести к снижению износостойкости. Твердость покрытий, сформированных СВС-электродами, достигает HV10/30 425, при этом микротвердость частиц TiC (22 ГПа) в 2 раза превышает твердость карбидов, полученных при наплавке электродами Т-590.

Таким образом, покрытия, наплавленные СВС-электродами СТИМ-2/30, могут оказывать боль-

шее сопротивление абразивному изнашиванию, тем самым увеличивая срок службы рабочих органов сельскохозяйственной техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tulaganova L., Yunushuzhaev S., Juraeva G. Improving the Wear Resistance and Durability of Cultivator Tools // J. Phys. Conf. Ser. 2022. V. 2373. P. 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/2/022026>
2. Сацук С.П. Влияние свойств абразивных частиц на износостойкость металлов // Наука без границ. 2019. Т. 32. № 4. С. 54–58.
3. Добрин Д.А., Афанасьев А.В., Митусов С.С., Пикулева И.М. Современные технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин // Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: сб. тр. Междунауч.-технической конф. (Москва, 24–26 мая 2022 года). М.: МашТех, 2022. С. 293–295.
4. Jancauskas V., Katinas E., Pusvaškis M. A Study of the Durability of Hardened Plough Point // J. Frict. Wear. 2020. V. 41. P. 78–84. <https://doi.org/10.3103/S1068366620010171>
5. Begori V., Reddy C., Raghupathi. Tribological Characteristics of Stellite Hard faced Layer on Mild Steel // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. C. 2022. V. 1248. P. 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1248/1/012039>
6. Учкин П.Г. Исследование покрытий рабочих органов глубоких рыхлителей, восстановленных плазменной наплавкой // Изв. ОГАУ. 2021. Т. 89. № 3. С. 126–131.
7. Томарев Г.И., Кязымов Ф.А., Валитов М.З., Персиянов С.В. Износостойкий наплавочный материал: Пат. № 2644718 РФ. Б. И. № 5. 9 с.
8. Столин А.М., Бажин П.М. Получение изделий многофункционального назначения из композитных и керамических материалов в режиме горения и высокотемпературного деформирования (СВС-экструзия) // ТОХТ. 2014. Т. 48. № 6. С. 603–615. <https://doi.org/10.7868/S0040357114060116>
9. Болоцкая А.В., Михеев М.В. Получение методом СВС-экструзии компактных керамических электродных материалов на основе системы Ti–B–Fe, модифицированных наноразмерными частицами AlN // Новые огнеупоры. 2020. № 6. С. 51–55. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2020-6-51-55>
10. Столин А.М., Бажин П.М., Михеев М.В., Аверичев О.А., Сагидоллаев А.С., Кылышбаев К.Т. Нанесение защитных покрытий электродуговой наплавкой СВС-электродами // Сварочное производство. 2014. № 8. С. 52–56.