

ВЛИЯНИЕ ТЕЛЛУРА НА МИКРОСТРУКТУРУ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА, НАПЛАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ СПОСОБОМ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю.М. Кусков¹, Ф.К. Биктагиров¹, М.А. Фесенко²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». г. Киев, просп. Победы, 37

Чугун является одним из основных конструкционных материалов, характеризующихся рядом ценных эксплуатационных свойств, в частности, износостойкостью. Обычно улучшение этого показателя достигается изменением структуры чугуна за счет введения в его состав дорогостоящих легирующих элементов. Проведенными экспериментами показана возможность превращения серого низколегированного чугуна в белый износостойкий за счет модифицирования наплавляемого металла небольшими порциями порошка теллура. Электрошлаковая наплавка осуществлялась в токоподводящем кристаллизаторе с плавлением в слое шлака присадки в виде стружки низколегированного чугуна и дополнительного ввода в шлаковую ванну порошковой проволоки с шихтой, содержащей порошок теллура. Библиогр. 6, рис. 9.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, стружка низколегированного чугуна, теллур, структура металла

Теллур относится к металлоидам и применяется в различных отраслях промышленности — химической, стекольной, полупроводниковой, резинотехнической, металлургической и др. В частности, в металлургии теллур используют для снижения поглощения азота жидким чугуном и сталью. Он эффективно измельчает зерно в стали, снижает пористость отливок из стали и чугуна [1]. Микродобавки теллура значительно улучшают структуру, механические свойства и обрабатываемость чугуна и стали [2].

Особое свойство этого элемента, которым можно воспользоваться при выполнении износостойкой наплавки, это влияние небольших количеств теллура — от 0,005 до 0,1 % на стабилизацию карбидов, например, вместо серого чугуна при наплавке можно получить белый чугун [3].

Интересен опыт изготовления литых чугунных прокатных валков из нелегированного и среднелегированного (2,0...4,5 % Ni и 0,5...1,5 % Cr) чугунов с присадкой в жидкий металл небольших добавок теллура, полученный в 1950-х годах [4]. Установлено, что он сильно тормозит графитизацию, увеличивает глубину отбела. Присадка 0,0001 % теллура эквивалентна снижению содержания кремния на 0,04 %, т. е. теллур тормозит графитизацию в 400 раз сильнее, чем кремний. Поэтому для улучшения качества отбеленного слоя валков вполне достаточна присадка 0,0002...0,0006 % теллура, что считается оптимальным для пассивирования неметаллических центров графитизации

в валковых расплавах. Избыток же теллура действует как карбидостабилизирующий фактор. И если для валков повышенное количество карбидов нежелательно с точки зрения их работоспособности, то при нанесении на детали относительно тонких наплавленных слоев с наличием в их структуре карбидной составляющей может не только значительно повысить износостойкость чугуна, но и существенно увеличить экономические показатели наплавки.

Данная работа посвящена изучению строобразования металла, получаемого электрошлаковой наплавкой стружкой низколегированного чугуна с дополнительной присадкой небольших количеств теллура.

Технологически такую задачу наиболее рационально решать с использованием при наплавке токоподводящего кристаллизатора (ТПК) [5]. При этом открытое зеркало шлаковой ванны позволяет успешно совмещать ввод через шлак в металлическую ванну наплавляемого металла стружки и присадки теллура.

Наплавку стружкой выполняли на стальную цилиндрическую заготовку диаметром 170 мм в ТПК диаметром 180 мм. В качестве устройства для подачи стружки использовали вибродозатор [6]. Учитывая мелкодисперсность порошка теллура, засыпка на поверхность шлаковой ванны могла привести как к его неравномерному распределению в металлической ванне, так и повышенному угару во время наплавки. Поэтому ввод порошка теллура в шлаковую ванну осуществляли

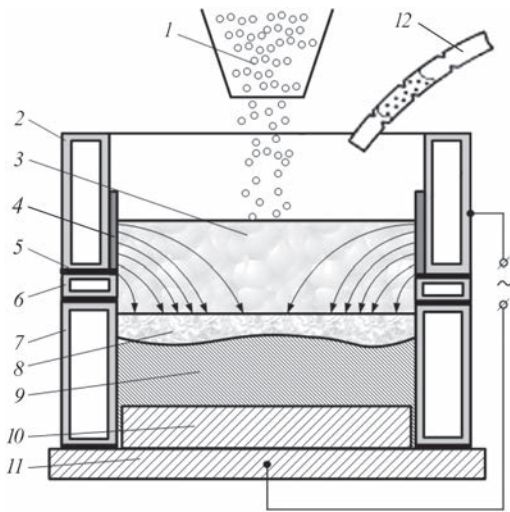


Рис. 1. Схемы электрошлаковой наплавки в ТПК дискретной присадкой (стружка) с дополнительной подачей в шлаковую ванну проволоки с шихтой порошка теллура: 1 — дискретная присадка (стружка); 2, 6, 7 — токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — металлическая ванна; 9 — наплавленный металл; 10 — заготовка; 11 — поддон; 12 — порошковая проволока с шихтой порошка теллура

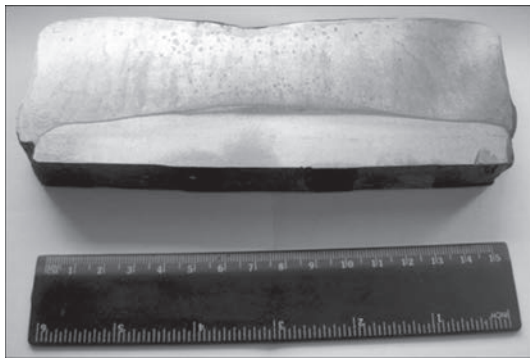


Рис. 2. Макрошлиф наплавленной заготовки

следующим образом. Из стальной ленты размером 0,5×12 мм формировали трубчатый стержень, внутрь которого помещали порошок теллура. Для исключения его высыпания и перемещения внутри стержня на последнем выполняли пережимы на расстоянии примерно 25 мм. Во время наплавки происходили совместно два процесса — постоянная подача стружки и периодическое окунание конца стержня в шлак. Расчетное количество вводимого теллура составило 0,2 % количества наплавляемого чугуна. Схема выполнения наплавки и продольный макрошлиф наплавленной заготовки представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Результаты измерений твердости по Роквеллу (*HRC*) наплавленного металла приведены на эскизе макрошлифа (рис. 3). Дополнительно выполнены измерения твердости по Бринеллю (*HB*) для оценки средней твердости композитного металла (матрица + включения).

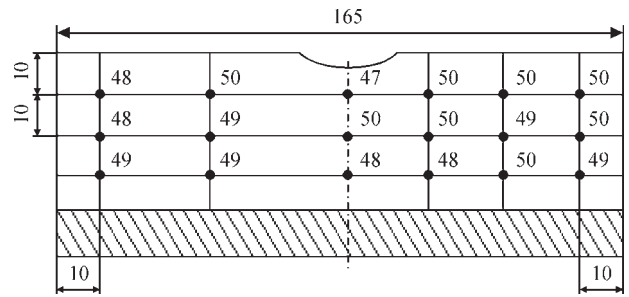


Рис. 3. Эскиз макрошлифа с показателями твердости (*HRC*) по сечению наплавленного слоя

Металлографические исследования выполняли на оптическом микроскопе ММР-4, имеющего приставку, позволяющую проводить фотографирование исследуемых зон микрошлифов (шлиф № 3 — по оси наплавленного слоя; шлиф № 1 — металл, закристаллизовавшийся у стенки кристаллизатора; шлиф № 2 — металл, расположенный примерно на середине расстояния между зонами 1 и 3), по аналогии с зонами замера макротвердости (см. рис. 3). Для измерения микротвердости структурных составляющих использовали твердомер ПМТ-3.

Оценка структуры наплавленного металла. Согласно результатам химического анализа остаточное содержание теллура в наплавленном металле 0,079...0,112 %. Наплавленный металл плотный, хотя в верхней части слоя по его оси имеется усадка глубиной примерно 5 мм. На поверхности шлифа наблюдаются неравномерно расположенные включения округлой формы диаметром не более 1...2 мм (рис. 4). Причем эти включения, в основном, расположены в центральной зоне шлифа на длине $L = 80$ мм. Более крупные включения и их конгломерат сосредоточены в зоне усадочной раковины, включения меньшего размера расположены у зоны сплавления основного и наплавленного металлов. В той же части наплавленного слоя, который кристаллизовался ближе к стенкам кристаллизатора ($L = 40$ мм) включения практически отсутствуют. Измерения микротвердости включений позволили их идентифицировать как выделения графита с $HV1 = 1,1...1,3$ ГПа.

Зона сплавления представляет собой линию, имеющую по краям скосы в сторону основно-

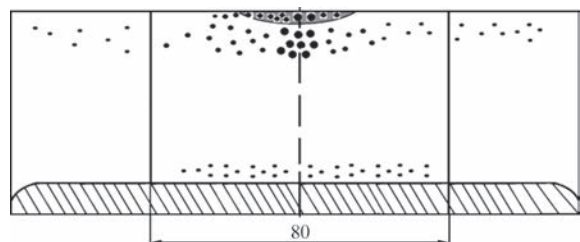


Рис. 4. Эскиз макрошлифа с расположенными на его поверхности включениями

го металла (проплавление составляет примерно 5 мм). Такая картина проплавления основного металла соответствует распределению линий тока в шлаковой ванне и характеру формирования металлической ванны при наплавке в ТПК (см. рис. 1).

В зависимости от величины проплавления изменением макротвердости (*HV*) переходной зоны от наплавленного металла к основному в шлицах 1–3 составляет: № 1 — 440...128; № 2 — 392...111; № 3 — 440...278.

Оценка микроструктуры зон микрошлифов

Образец № 1 (рис. 5). Основными составляющими структуры наплавленного металла являются цементит (Ц), ледебурит (Л) и перлит (П). Встречаются редкие включения междендритного графита (Г). Микротвердость структурных составляющих характеризуется следующими значениями (ГПа): Ц — 4,8...6,45; Л — 4,2...4,4; П — 3,1...3,2; Г — 1,1...1,3. В целом такое наличие структурных составляющих соответствует структуре белого износостойкого чугуна.

Зона сплавления металлов (рис. 6) представлена в виде нескольких переходных слоев: основной металл (*a*) — (ферритно-перлитная сталь) (*б*) узкая полоска ($\delta = 1...2$ мм) металла, имеющего состав, полученный в результате перемешивания

наплавляемого металла и основного (*б*) — слой с небольшим количеством характерных игл мартенсита либо видманштетта — слой наплавленного чугуна.

Образец № 2 (рис. 7). Структура этой части наплавленного металла во многом соответствует структуре образца № 1. Отличие состоит в том, что имеется большое количество графитных включений, особенно в верхней части слоя. Если исключить из рассмотрения колонии графитных включений, то данная структура также соответствует структуре белого чугуна.

Зона сплавления металлов (рис. 8) также состоит из нескольких слоев, но границы слоев более четкие, что можно объяснить меньшим проплавлением основного металла.

Образец № 3 (рис. 9). Наплавленный металл этого образца имеет наиболее сложную структуру, сформировавшуюся вследствие некоторых особенностей применявшейся техники ЭШН в ТПК. Как видно из рис. 1, дискретный наплавочный материал (в нашем случае стружка) подается на поверхность шлаковой ванны в области расположения ее вертикальной оси (по центру кристаллизатора). В случае, если скорость подачи присадки не соответствует принятому электрическому режиму наплавки или иными словами тепловому

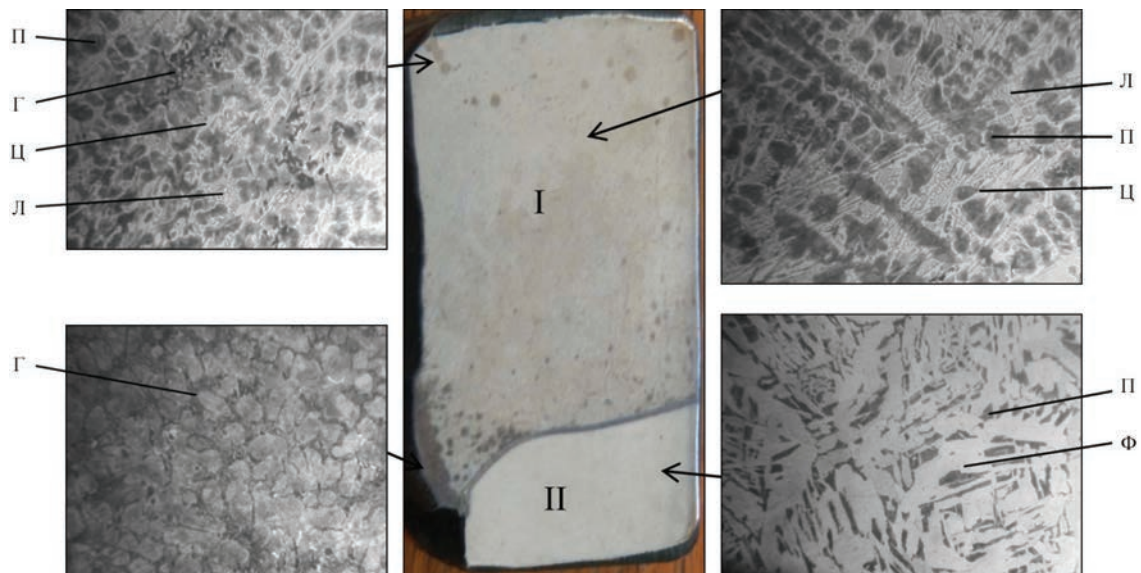


Рис. 5. Микроструктура ($\times 100$) наплавленного металла микрошлифа № 1: I — наплавленный металл; II — основной металл



Рис. 6. Микроструктура ($\times 100$) зоны сплавления микрошлифа № 1 (описание *a–в* см. в тексте)

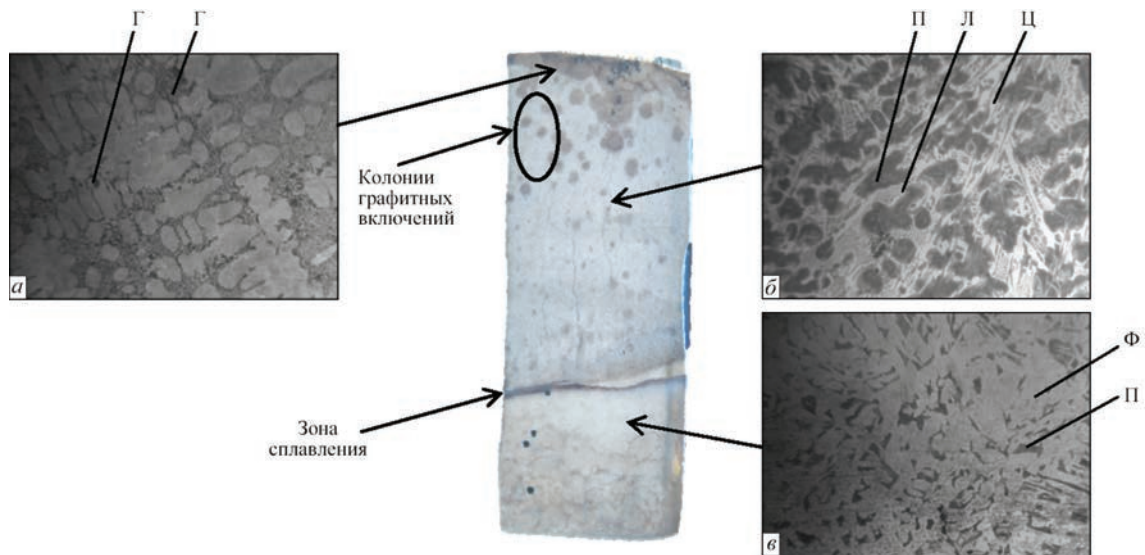


Рис. 7. Микроструктура ($\times 100$) наплавленного металла микрошлифа № 2

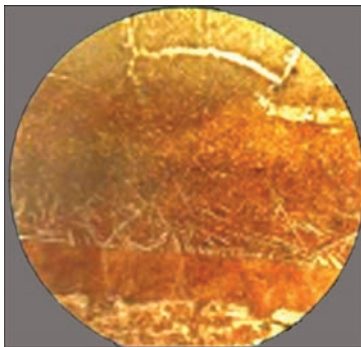


Рис. 8. Микроструктура ($\times 30$) зоны сплавления микрошлифа № 2

состоянию ванны, возникает следующая ситуация. С одной стороны, не весь объем подаваемой присадки успевает полностью расплавиться, с другой, образующийся столб нерасплавленной или недоплавленной присадки препятствует равномерному распределению частиц теллура и его взаимодействию с жидким металлом во всем его объеме.

Именно этими причинами объясняется полученная при наплавке структурная неравномерность по сечению наплавленного слоя. Кроме того, в данном эксперименте последние порции стружки не только не успели полностью расплавиться, но и сконцентрировались в узкой поверхностной зоне усадочной раковины. В результате там, где произошло это скопление, структура металла состоит из графита пластинчатой формы, цементита, ледебурита и перлита. При этом как в зоне скопления, так и при наличии отдельных крупных включений графит распределяется в виде сильно разветвленных ветвей, расположенных в междендритном пространстве. В результате там, где графит представлен в достаточно большом количестве, наблюдается структура половинчатого чугуна ($\Gamma + \Pi + \Psi + \text{Л}$). В местах с его пониженным содержанием структура соответствует белому чугуна ($\Pi + \Psi + \text{Л}$).

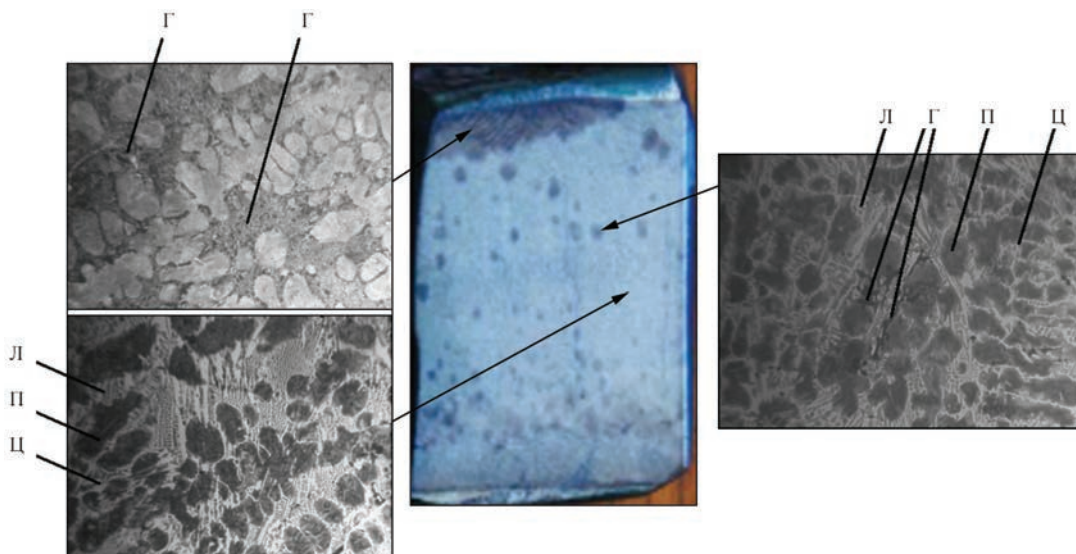


Рис. 9. Микроструктура ($\times 100$) наплавленного металла микрошлифа № 3

Таким образом, проведенными исследованиями доказана возможность получения при электрошлаковой наплавке в ТПК износостойкого чугуна путем модифицирования теллуром жидкого металла наплавляемой присадки в виде стружки низколегированного серого чугуна. Однако для равномерного взаимодействия теллура со всем объемом жидкого металла необходимо обеспечить при наплавке соответствие массовой скорости и размеров подаваемой присадки электрическим режимам процесса ЭШН.

Список литературы

1. Киндяков П.С., Коршунов Б.Г., Федоров П.И., Кисляков И.П. (1976) *Химия и технология редких и рассеянных элементов*. Ч.3. Москва, Высшая школа.
2. (1985) *Свойства элементов*. Справочное изд. Дрица М.Е. (ред.). Москва, Metallurgiya.
3. Гудремон Э. (1966) *Специальные стали*. Т. 3. Москва, Metallurgiya.
4. Кривошеев А.Е. (1957) *Литые валки*. Москва, Metallurgizdat.

5. Кусков Ю.М., Гордань Г.Н., Богайчук И.Л., Кайда Т.В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа приготовления. *Автоматическая сварка*, **5** 6, 34–37.
6. Шупак Г.Б., Ус В.И., Кусков Ю.М. и др. (1993) Система дозирования присадочных материалов в электрошлаковой технологии. *Проблемы спец. электрометаллургии*, **1**, 29–31.

References

1. Kindyakov, P.S., Korshunov, B.G., Fedorov, P.I., Kislyakov, I.P. (1976) *Chemistry and technology of rare and scattered elements*. Pt 3. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
2. (1985) *Properties of elements*. In: Refer ed. Ed. by M.E. Dritsa. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Houdremont, E. (1966) *Special steels*. Vol. 3. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Krivosheev, A.E. (1957) *Cast rollers*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
5. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L., Kajda, T.V. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, **5** 6, 30-33.
6. Shchupak, G.B., Us, V.I., Kuskov, Yu.M. et al. (1993) Dosing system of filler materials in electroslag technology. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 29-31 [in Russian].

ВПЛИВ ТЕЛУРУ НА МІКРОСТРУКТУРУ НИЗЬКОЛЕГОВАНОГО ЧАВУНУ, НАПЛАВЛЕНОГО ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ СПОСОБОМ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Ю.М. Кусков¹, Ф.К. Біктагіров¹, М.А. Фесенко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». м. Київ, просп. Перемоги, 37

Чавун є одним з основних конструкційних матеріалів, що мають ряд цінних експлуатаційних властивостей, зокрема, зносостійкість. Зазвичай поліпшення цього показника досягається зміною структури чавуну за рахунок введення в його склад дорогих легуючих елементів. Проведеними експериментами показана можливість перетворення сірого низколегованого чавуну в білий зносостійкий за рахунок модифікування наплавляючого металу невеликими порціями порошку телуру. Електрошлакове наплавлення здійснювалося в струмопідвідному кристалізаторі з плавленням в шарі шлаку присадки у вигляді стружки низколегованого чавуну і додаткового введення в шлакову ванну порошкового дроту з шихтою, що містить порошок телуру. Бібліогр. 6, рис. 9.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, стружка низколегованого чавуну, телур, структура металу

EFFECT OF TELLURIUM ON MICROSTRUCTURE OF LOW-ALLOYED CAST IRON DEPOSITED BY ELECTROSLAG METHOD IN CURRENT-CARRYING MOLD

Yu.M. Kuskov¹, F.K. Biktagirov¹, M.A. Fesenko²

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Pobedy Ave., Kiev-56, Ukraine

Cast iron is one of the main structural materials, having a number of valuable service properties, in particular wear resistance. Usually, improvement of this indicator is achieved by changing the structure of cast iron due to introduction of expensive alloying elements into its composition. The carried out experiments showed the possibility of transforming a gray low-alloyed iron to white wear-resistant one due to modification of deposited metal by small portions of tellurium powder. Electroslag surfacing was carried out in a current-carrying mold with melting of filler in the slag layer in the form of chips of a low-alloy cast iron and additionally introducing of flux-cored wire with a charge, containing tellurium powder into the slag pool. 6 Ref., 9 Fig.

Keywords: electroslag surfacing, current-carrying mold, low-alloy cast iron chips, tellurium, metal structure

Поступила в редакцію 09.04.2019