ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕССВИНЦОВИСТЫХ, ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ЛЕГКООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ*

*А. В. РЯБОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры
“Техника и технологии производства материалов”, avrmetall@ya.ru
(ФГАОУ ВО “Южно-Уральский государственный университет (НИУ)”, Россия, г. Челябинск)*

Аннотация. В отечественной и мировой черной металлургии ведутся активные поиски альтернативных экологически чистых легкообрабатываемых сталей, имеющих характеристики обрабатываемости резанием и механические свойства, сопоставимые со свинецсодержащими сталями, но лишенных их недостатков, и в первую очередь не столь экологически вредных. Представлены научные и технологические аспекты производства бессвинцовых легкообрабатываемых сталей, легированных висмутом, кальцием, оловом, бором и азотом. Определена растворимость висмута в железе и сплавах железа с хромом, марганцем, кремнием, никелем, вольфрамом, ванадием, кобальтом, фосфором, серой, алюминием, углеродом и рядом других элементов при температуре 1550–1650 °С. Вычислены параметры взаимодействия первого и второго порядка. Осуществлено исследование поведения висмутовых и оловянных сферических образцов в расплаве стали 40X на высокотемпературной установке с контролируемой атмосферой и рентгенотелевизионной системой наблюдения. Проведено моделирование фазовых составов многокомпонентных сплавов стали АВЦ40ХГНМ с помощью программного пакета FactSage. В ходе исследования разработана и внедрена технология производства бессвинцовых, экологически чистых легкообрабатываемых сталей в ООО “Златоустовский электрометаллургический завод”. Предметом исследования являлись легкообрабатываемые конструкционные и коррозионностойкие стали, легированные висмутом и кальцием (АВЦ19ХГН, АВЦ40Х, АВЦ40ХГНМ, АВЦ12Х18Н10, АВЦ40Х13, АВЦ14Х17Н2), легированные оловом (АО40Х, АО30ХМ) и BN-содержащие стали (А38ХГМАР и А30ХМАР) в виде кованой заготовки диам. 10, 20 и 80 мм и слитков массой 18 и 500 кг (круг 345 мм). Определены качественные характеристики стали: механические свойства в продольном и поперечном сечении; равномерность распределения легкоплавких элементов, углерода и серы по высоте осевой зоны и в поперечных сечениях слитка. Получены фотографии макроструктуры слитков по высоте и сечению. Выполнена оценка прокаливаемости и загрязненности стали неметаллическими включениями, величины аустенитного зерна, обрабатываемости стали резанием, качества поверхности передельной заготовки и макроструктуры стали. Проведены сравнительные экологические исследования загрязненности атмосферы при легировании стали.

Ключевые слова: бессвинцовые легкообрабатываемые стали, легирование висмутом, кальцием, оловом, BN-содержащие стали, качественные характеристики стали, загрязненность атмосферы при легировании стали.

Ссылка для цитирования. Рябов А.В. Освоение производства бессвинцовых, экологически чистых легкообрабатываемых сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 3. С. 337–343.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-337-343

MASTERING OF PRODUCTION OF LEAD-FREE ECOLOGICALLY CLEAN FREE-MACHINING STEELS

*A. V. RYABOV, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt “Equipment and technology
of materials production”, avrmetall@ya.ru
(FGAOU VO “South-Ural State University (NIU)”, Russia, Chelyabinsk)*

Abstract. Both in the domestic and world steel industry alternative ecologically clean free-cutting steels, having cutting machinability characteristics and mechanical properties, comparable with lead-containing steels, but voided of their drawbacks, are actively searched. First of all the alternative steels should not be not so ecologically harmful. Scientific and technological aspects of lead-free free-machining steels production, alloyed by bismuth, calcium, tin, boron and nitrogen presented. Solubility of bismuth in iron and iron alloys with chromium, manganese, nickel, tungsten, vanadium, cobalt, phosphorus, sulphur, aluminum, carbon and other elements at the temperature of 1550–1650 °C determined. Parameters of interaction of the first and second order calculated. Study of bismuth behavior and tin spherical samples in 40X steel melt accomplished. The study done at the high temperature facility with controlled atmosphere and X-ray TV observation system. Simulation of phase compositions multicomponent alloys of steel АВЦ40ХГНМ accomplished by application of a program package FactSage. Within the study, a production technology of lead-free, ecologically clean free-machining, steels elaborated and mastered at OJSC “Zlatoust electro-metallurgical works”. Free-machining corrosion-resistant steels (АВЦ19ХГН, АВЦ40Х, АВЦ40ХГНМ, АВЦ12Х18Н10, АВЦ40Х13, АВЦ14Х17Н2) alloyed by bismuth and calcium, steels (АО40Х, АО30ХМ) alloyed by tin, and steels (А38ХГМАР and А30ХМАР) containing BN were the objects of the study. The steels samples were in the form of forged billet of 10, 20 and 80 mm diameter and ingots of 18 and 500 kg

* Южно-Уральский государственный университет благодарен за финансовую поддержку Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 11.9679.2017/БЧ).

(round 345 mm). Steel quality characteristics determined such as mechanical properties in longitudinal and cross directions of ingots, uniformity of distribution of fusible elements, carbon and Sulphur along the axis zone and in billet transverse sections. Pictures of ingots macrostructure by height and section obtained. Estimation of hardenability and steel contamination by non-metallic inclusions, austenitic grain size, steel machinability by cutting, surface quality of re-worked billet and steel macrostructure accomplished. Comparable ecological studies of atmosphere contamination during the steel alloying also accomplished.

Key words: lead-free free-machining steels, alloying by bismuth, calcium, tin; BN-containing steels, steel quality characteristics, atmosphere contamination during steel alloying.

For citation. Ryabov A.V. Mastering of production of lead-free ecologically clean free-machining steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 337–343. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-337–343

В связи с потребностью повышения производительности труда в машиностроении, в том числе за счет применения сталей с высокой обрабатываемостью резанием, внимание исследователей-металлургов было обращено на производство сталей, легированных свинцом. В отличие от серы и фосфора свинец не снижает механических свойств стали и в то же время позволяет повысить производительность обработки резанием на 20–50 %, улучшить качество поверхности готовых изделий, увеличить срок службы инструмента в 2–3 раза. По этой причине свинец-содержащие стали остаются наиболее распространенным видом легкообрабатываемых сталей [1].

Однако к настоящему времени стала очевидной бесперспективность дальнейшего увеличения содержания свинца, поскольку оно не приводит к улучшению обрабатываемости стали, однако вызывает ухудшение механических характеристик и рост их анизотропии, а также способствует усилению красноломкости поверхностного слоя в процессе горячей обработки металла давлением. Кроме того, свинецсодержащим сталям свойствен ряд недостатков, в частности неравномерное распределение свинца в теле слитка вследствие его большой физической плотности и высокой упругости пара. Это затрудняет гарантированное получение требуемых свойств стали от плавки к плавке и обуславливает понижение выхода годного металла, а следовательно, и производительности процесса обработки давлением из-за образования дефектов в местах наибольшего скопления свинца. Во время горячего пластического деформирования стали, содержащей свинец, происходит его диффузия на поверхность заготовки, что приводит к образованию в указанной области капиллярного слоя, ухудшающего условия захвата валками полосы металла вследствие уменьшения коэффициента трения, и снижению производительности прокатного оборудования.

Главный недостаток автоматных сталей, легированных свинцом, заключается в том, что он очень токсичен и согласно установленным на сегодняшний день гигиеническим нормативам относится к наивысшему, 1-му классу опасности, поэтому в черной металлургии все отчетливее

прослеживается тенденция к отказу от его применения вследствие серьезного ухудшения экологии окружающей среды. Как и большинство тяжелых металлов, свинец вреден для человека даже в очень малых количествах. После всасывания в организм он объединяется с определенными ферментами и тормозит их функции. Зачастую возникают тяжелые физиологические или неврологические последствия. Длительное воздействие может вызвать многочисленные проблемы со здоровьем, в том числе анемию и другие заболевания крови, повреждения нервной системы и головного мозга, а также почек, заболевания печени и мозга. Свинец сохраняется в почве, воздухе, питьевой воде и в домах, и его очень трудно удалить после попадания в окружающую среду.

Поэтому в мире ведутся активные поиски альтернативных экологически чистых легкообрабатываемых сталей, имеющих характеристики обрабатываемости резанием и механические свойства, сопоставимые со свинецсодержащими сталями (рис. 1), но лишенных их недостатков и в первую очередь не столь экологически вредных. Впервые в 50–60-х годах прошлого века для улучшения обрабатываемости начали применять теллур и селен [1]. Однако эти элементы также чрезвычайно токсичны, а кроме того, имеют высокую стоимость. Стали с кальцием лишены этих недостатков, но имеют довольно ограниченную область применения [1]. Попытки заменить свинецсодержащие стали привели к производству бессвинцовистой автоматной стали, содержащей бор [2]. Но сталь, легированная бором, достигает уровня обрабатываемости автоматной стали со свинцом только при внешнем резании.

В последние годы в связи с резким ростом озабоченности экологическими вопросами во всем мире интерес к разработке новых бессвинцовистых сталей и технологии их производства резко усилился. Можно указать целый ряд новых активно развиваемых направлений производства экологически чистых легкообрабатываемых сталей, альтернативных свинецсодержащим. Первое направление — получение новых сталей, легированных легкоплавкими элементами, например висмутом, кальцием, оловом и др., и резуль-

фурированных сталей с равномерным распределением сульфидов марганца и оксидов. Второе направление — получение графитизированных легкообрабатываемых сталей; сталей, содержащих включения нитридов бора (BN), сульфиды, альтернативные сульфиду марганца (например, TiS), и др. [3–6].

Рис. 1. Качественные характеристики стали

Fig. 1. Quality characteristics of steel

В большинстве этих новых видов сталей для повышения обрабатываемости применяется образование или модификация существующих в стали неметаллических включений, и поэтому для них в большей или меньшей мере характерны все недостатки, обусловленные этими включениями: анизотропия свойств, пониженная усталостная прочность, повышенная склонность к хрупкому разрушению и т. д.

Экологически благоприятным элементом, не оказывающим отрицательного воздействия на свойства и повышающим обрабатываемость стали резанием на уровне свинца, является висмут. Предельно допустимая концентрация (ПДК) в рабочей зоне для висмута составляет $0,50 \text{ мг/м}^3$, тогда как свинца — всего $0,01 \text{ мг/м}^3$, т. е. в 50 раз меньше. Учитывая высокую токсичность свинца при производстве стали, на различных ее переделах необходимо иметь дорогостоящие сооружения, которые аккумулируют выносимые из воздушного пространства пары и оксиды свинца. Висмут же, имея более высокое значение ПДК, позволяет отказаться от применения дорогостоящего оборудования для аккумуляирования его паров и оксидов.

Исходя из анализа литературы [1], экологически чистую легкообрабатываемую висмутсодержащую сталь можно использовать при тех же условиях статического механического нагружения, при которых применяется свинцовистая и свинцовотеллуристая продукция.

В литературе имеется материал по влиянию висмута на свойства стали и ее обрабатываемость

резанием, но почти не изучены физико-химические условия растворения свинца и висмута в твердом и жидком железе и его сплавах. Сложность определения растворимости связана с физико-химическими свойствами висмута (низкая температура плавления — 271°C , температура кипения ниже температуры выплавляемой стали — 1560°C , высокая упругость пара, высокая плотность — $9,750 \text{ кг/м}^3$). Для проведения экспериментов необходимо было создать следующие условия: герметизация рабочего пространства, создание и поддержание высокой температуры ($1500\text{--}1700^\circ\text{C}$) в течение определенного периода времени, получение высокого давления в реакционной зоне, получение закаленного слитка после опыта, автоматическое регулирование продолжительности эксперимента. Поэтому для проведения опытов была модернизирована и создана печь высокого давления в Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ).

Насыщение жидкого железа висмутом проводили через газовую фазу в закрытом молибденовом контейнере с притертой крышкой, помещенном в графитовый тигель с завинчивающейся крышкой. Опыты проводили в атмосфере аргона в интервале температур $1550\text{--}1620^\circ\text{C}$ с шагом 10°C . Продолжительность эксперимента составляла 1 ч.

Изучение растворимости висмута и свинца в сплавах железа с хромом, марганцем, кремнием, никелем, вольфрамом, ванадием, кобальтом, фосфором, серой, алюминием, углеродом и рядом других элементов проводилось при температуре $1550\text{--}1650^\circ\text{C}$ с шагом 25°C по методике, аналогичной для определения растворимости висмута в жидком железе.

По результатам экспериментальных опытов были вычислены параметры взаимодействия первого и второго порядка, получены данные о растворимости висмута в железе и его сплавах при повышенном (2 атм) и атмосферном давлении, получены температурные зависимости растворимости висмута в жидком железе в интервале температур $1550\text{--}1620^\circ\text{C}$.

Висмут имеет высокую упругость пара, обладает малой растворимостью в жидком и твердом железе, а также в стали, что обуславливает сложность его введения в последнюю, неустойчивость достигаемых результатов его усвоения и, следовательно, получаемого при легировании эффекта. Это, в свою очередь, вызывает необходимость проведения исследования по анализу существующих способов легирования стали легкоплавкими элементами с целью дальнейшей разработки или корректировки технологии легирования стали висмутом.

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день существует множество способов

легирования стали легкоплавкими элементами, но так как висмут относится к легкоплавким, легкоокисляющимся и легкоиспаряющимся элементам, процесс его введения в сталь необходимо осуществлять во время разливки металла в изложницы или на МНЛЗ. Также несмотря на большую патентоспособность, в литературе отсутствуют важнейшие сведения об элементах технологии получения висмутосодержащей стали высокого качества [1, 7]. Если и есть данные, то они касаются только свинца или свинца и висмута, но пример реализации дан для легирования стали свинцом [1].

В работе исследовали поведение висмутовых сферических образцов diam. 1, 2, 3–10 мм в расплаве стали 40Х. Опыт имитировал легирование стали висмутовой дробью. Полученные данные можно использовать для прогнозирования и корректировки технологии легирования автоматной стали. Холодные шарики сбрасывали в расплав с высоты примерно 300 мм из специального устройства, управляемого дистанционно. Температура стали — 1550–1560 °С. Опыты проводили на высокотемпературной установке с контролируемой атмосферой и рентгенотелевизионной

системой наблюдения кафедры “Теория металлургических процессов” Уральского федерального университета [8].

В ходе исследования были получены следующие результаты: время расплавления, скорость испарения, характер и траектория движения и изменение геометрических размеров образцов висмута, на основании которых была разработана математическая модель нагрева, расплавления и испарения висмутовой дроби.

Дальнейшие работы по расширению марочного сортамента бессвинцовистых, экологически чистых легкообрабатываемых сталей направлены на освоение комплекснолегированных сталей. С целью оценки реальных составов бессвинцовистых, экологически чистых легкообрабатываемых висмуталейсодержащих сталей было проведено моделирование фазовых составов многокомпонентных сталей: АВЦ40Х13, АВЦ14Х17Н2, АВЦ12Х18Н10, АВЦ12ХН, АВЦ19ХГН, АВЦ20ХГНМ, АВЦ35Г2, АВЦ38ХГМ, АВЦ40Х, АВЦ40ХГНМ, АО40ХГНМ, АО40Х, АО30ХМ; АО38ХГМ, АО19ХГН, АО20ХГНМ, А45АР, А38ХГМАР и А30ХМАР (В — висмут, Ц — кальций, О — олово).

Рис. 2. Логарифмическая зависимость масс фаз от температуры для стали АВЦ40ХГНМ

Fig. 2. Logarithm dependence of phases mass on temperature for steel АВЦ40ХГНМ

Рассмотрен процесс моделирования производства стали АВЦ40ХГНМ следующего химического состава, % (мас.): 0,37–0,43 С; 0,17–0,37 Si; 0,50–0,80 Mn; до 0,025 S; до 0,025 P; 0,60–0,90 Cr; 0,15–0,25 Mo; 0,40–0,70 Ni; 0,08–0,12 Bi; 0,002–0,003 Ca; 0,005–0,015 Al; до 0,25 Cu. Кроме того, сталь содержит кислород (0,005 %) и азот (0,008 %). При определении концентрации того или иного элемента в системе использовали средние арифметические значения между верхним и нижним пределами его допустимой концентрации в стали. Для моделирования использован блок Equilib и базы FSstel, FToxid, FactPS. Зависимость фазового состава изученных систем от температуры представлена на рис. 2.

Видно, что выделение висмута следует ожидать в виде отдельной фазы по границам зерен металла (поскольку образование самостоятельной твердой фазы из расплава произойдет при температурах ниже 300 °С, когда зерна основных фаз будут сформированы). В результате введения кальция и алюминия образуются алюминаты кальция, которые будут вместе с включениями висмута улучшать обрабатываемость стали и препятствовать зарастанию стаканов при разливке стали. При прокатке по границам зерен будут выделяться нитриды алюминия, которые выступают как регуляторы роста зерна.

На первом этапе исследования были проведены лабораторные эксперименты. Предметом исследования являются легкообрабатываемые стали в виде передельной заготовки diam. 10 и 20 мм и слитки массой 17–18 кг (круг 50 мм). Выплавку стали проводили в индукционной печи вместимостью 80 кг, легирование висмутом и кальцием осуществляли в процессе разливки сверху с помощью дозирующего устройства, олово, бор и азот давали в печи. В процессе исследования отработали технологические режимы получения стали. Определены качественные характеристики ковальной и литой стали.

В ходе исследования разработана технология выплавки, внепечной обработки и разливки бесцинковистых, экологически чистых легкообрабатываемых сталей в ООО “Златоустовский электрометаллургический завод” (ЗЭМЗ).

Промышленные эксперименты проведены в производственных условиях: выплавка, разливка и легирование стали висмутом и кальцием в электросталеплавильном цехе № 3, ковка в молотовом цехе ООО ЗЭМЗ, оценку обрабатываемости металла резанием проводили на технической базе ЮУрГУ. Предметом исследования являлись легкообрабатываемые конструкционные стали, легированные висмутом и кальцием (АВЦ19ХГН, АВЦ40Х, АВЦ40ХГНМ), и легкообрабатываемые коррозионностойкие стали, легированные висмутом и кальцием (АВЦ12Х18Н10, АВЦ40Х13, АВЦ14Х17Н2), легкообрабатывае-

мые конструкционные стали, легированные оловом (АО40Х и АО30ХМ), в виде ковальной заготовки diam. 20 и 80 мм и слитков массой 500 кг (круг 345 мм).

Выплавку всех марок стали проводили по действующей технологии ООО ЗЭМЗ в открытой индукционной печи емкостью 1 т, разливка стали осуществлялась сифонным методом на два слитка массой по 500 кг. Один слиток в дальнейшем подвергался ковке, второй — исследованию в литом состоянии. Изменения в технологии выплавки касались процесса раскисления, получения остаточного алюминия в стали и дополнительной подачи за 2–3 мин до выпуска кускового силикокальция на 0,06 % кальция без учета угара. Легирование стали висмутом проводилось в процессе разливки через трубу дозатора путем подачи дробы на струю разливаемого металла со следующими особенностями: открытие затвора дозатора производили через 10–15 с после начала разливки, а подачу дробы прекращали до начала заполнения прибыльной части слитка.

Предварительно приготовленная порция висмутовой дробы перемешивалась с серебристым графитом в количестве 10–20 г. Перед разливкой каждой плавки проводили опробование работы дозатора с выдачей дробы вхолостую и регулировкой времени полной выдачи из него дробы.

Определены качественные характеристики литой конструкционной и коррозионностойкой сталей: оценили равномерность распределения легкоплавких элементов (висмута, кальция, олова), углерода и серы по высоте осевой зоны и в поперечных сечениях слитка, получены фотографии макроструктуры слитков по высоте (рис. 3) и сечению.

Рис. 3. Слиток стали АВЦ40ХГНМ массой 0,5 т

Fig. 3. Ingot of АВЦ40ХГНМ steel, mass 0.5 t

Определены качественные характеристики конструкционных и коррозионностойких сталей в передельной квадратной заготовке со стороной 20 и 80 мм: механические свойства (временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость, твердость) в продольном и поперечном сечении. Механические свойства стали находятся на одном уровне с нелегированной. Имеется запас по прочностным и пластическим характеристикам по отношению к требованию технических условий.

Присутствие висмута в стали приводит к измельчению зерна (ГОСТ 5639–82) даже на плавах, где содержание алюминия является критическим и не может обеспечить аустенитное зерно, соответствующее баллу 6.

Загрязненность неметаллическими включениями в конструкционных сталях оценивали по максимальному и среднему баллу (ГОСТ 1778–70). В металле всех плавок отсутствовали силикаты пластичные, нитриды точечные и строчечные. В прутках с квадратным сечением 80 мм максимальный балл по сульфидам составил 3, по оксидам точечным — 0,5, оксидам строчечным — 4, силикатам хрупким и деформирующимся — 5. Отмеченная закономерность по загрязненности неметаллическими включениями характерна для конструкционной стали, выплавляемой в открытых дуговых печах с основной футеровкой, и она не зависит от легирования стали легкоплавкими и легкоиспаряющимися элементами.

Качество поверхности передельной заготовки (кв. 80 мм) удовлетворяет техническому заданию на выплавку. Качество макроструктуры оценивали по шкалам ГОСТ 10243–62. Оценку равномерности распределения висмута и кальция осуществляли в заготовке (кв. 80 мм) в пробах литер А, Б, С, У, 1, 2, 3 в зоне 1/2 радиуса.

Прокаливаемость конструкционных сталей изучена в соответствии с ГОСТ 5657–69. На основании полученных результатов построены кривые прокаливаемости опытных сталей с вис-

мутом и кальцием, которые были сопоставимы с полосами прокаливаемости сталей 19ХГН, 40ХГНМ, 40Х соответственно.

Оценку стойкости сталей АВЦ40Х13, АВЦ14Х17Н2 и АВЦ12Х18Н10 к межкристаллитной коррозии проводили на образцах толщиной 5 мм методом АМУ согласно ГОСТ 6032–2003. В результате исследования выявлено, что висмут и кальций не влияют на межкристаллитную коррозию.

Результаты исследования макро- и микроструктуры сварного соединения стали АВЦ12Х18Н10 со сталью 12Х18Н10 показали, что в зоне сварки трещин не обнаружено, а выделение карбидов по границам зерен не превышает нормы. Следовательно, можно сделать вывод, что данная сталь с добавлением висмута и кальция не уступает по свариваемости аналоговой.

В работе проведены сравнительные экологические исследования загрязненности атмосферы при легировании стали висмутом, кальцием, оловом, бором и азотом в сопоставлении с ПДК в лабораториях ЮУрГУ и в электросталеплавильном и молотовом цехах ООО ЗЭМЗ. Выплавка, разливка и прокатный передел висмуткальцийсодержащей, оловосодержащей и ВN-содержащей сталей по сравнению со свинецсодержащей не сопровождаются загрязнением рабочих мест вредными веществами в количествах, превышающих ПДК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рябов А.В. Бессвинцовистые экологически чистые легкообрабатываемые стали. Проблемы производства. Перспективы. Аналитический обзор // *Электromеталлургия*. 2016. № 12. С. 36–45.
2. Лю Х.-Т., Чень В.-Ц. Влияние бора на горячую пластичность низкоуглеродистой ресульфурированной автоматной стали // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 5. С. 24–29.
3. Никитин М.С., Рябов А.В. К вопросу об оценке степени усвоения и равномерности распределения олова при легировании стали // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия*. 2011. № 36. Вып. 17. С. 26–29.
4. Чжан Ю.Ц., Хань Ц.Т. Research on machinability of tin-bearing free cutting steel // *Физика и химия обработки материалов*. 2018. № 4. С. 65–70.
5. Чжан Ю.Ц., Хань Ц.Т. Микроструктура и свойства графитизированной автоматной стали // *Металлы*. 2018. № 2. С. 33–36.
6. Чжан Ю.Ц., Хань Ц.Т. Исследование процесса графитизации автоматной стали // *Металлы*. 2018. № 12. С. 61–63.
7. Рябов А.В., Чуманов И.В. О возможности получения новой легкообрабатываемой коррозионностойкой стали // *Электromеталлургия*. 2012. № 2. С. 33–35.
8. Рябов А.В., Панфилов А.М., Семенова Н.С. Рентгенотелевизионное исследование процесса внедрения олова в стальной расплав // *Расплавы*. 2016. № 1. С. 35–46.

Поступила 14 января 2019 г.

REFERENCES

1. Ryabov A.V. Lead-free, environmentally friendly, easily machined steels: production problems, prospects, analytical review. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 12, pp. 36–45. (In Russ.).
2. Lyu Kh.-T., Chen' V.-Ts. The effect of boron on the hot plasticity of low-carbon resulfurized automation-grade steel. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2015, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).
3. Nikitin M.S., Ryabov A.V. To the matter of assessing the degree of assimilation and uniformity of distribution of tin during alloying of steel. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 36, Ser.: Metallurgiya, Vyp. 17, pp. 26–29. (In Russ.).
4. Chzhan Yu.Ts., Khan' Ts.T. Research on machinability of tin-bearing free cutting steel. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2018, no. 4, pp. 65–70. (In Russ.).
5. Chzhan Yu.Ts., Khan' Ts.T. Microstructure and properties of automatic graphitized steel. *Metally*, 2018, no. 2, pp. 33–36. (In Russ.).
6. Chzhan Yu.Ts., Khan' Ts.T. The study of the graphitization process of automatic steel. *Metally*, 2018, no. 12, pp. 61–63. (In Russ.).
7. Ryabov A.V., Chumanov I.V. On the possibility of obtaining a new, easily machining corrosion-resistant steel. *Elektrometallurgiya*, 2012, no. 2, pp. 33–35. (In Russ.).
8. Ryabov A.V., Panfilov A.M., Semenova N.S. X-ray TV study of the process of introducing tin into a steel melt. *Rasplavy*, 2016, no. 1, pp. 35–46. (In Russ.).

Received 14 January 2019