

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 10, 2017

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 60

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)

АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)

БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)

БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», г. Москва)

ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)

КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)

КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)

ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)

МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)

РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)

РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjvzv@sibsiiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Шинкин В.Н.** Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов в многороликовой правильной машине 777
- Козырев Н.А., Усолцев А.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Шинкин П.Е.** Современные методы сварки рельсов нового поколения 785

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Водолеев А.С., Андроханов В.А., Бердова О.В., Юмашева Н.А., Черданцева Е.С.** Экологически безопасная консервация отходов железорудного обогащения 792

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Стулов В.В., Алдунин А.В.** О технологии получения горячекатаного листа заданного качества с использованием новой технологии разлива слябов большого поперечного сечения 798
- Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадьков В.Н.** Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей 804

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Темлянец М.В., Якушевич Н.Ф.** Термодинамическое обоснование возможности использования высокотемпературных факелов горения для окисления примесей расплава в агрегатах конвертерного типа. Сообщение 2. Взаимодействие факела горения с металлом и шлаком в конвертерной ванне 811
- Бабенко А.А., Жучков В.И., Уполовникова А.Г., Кель И.Н.** Изучение вязкости шлаков системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ 820

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В., Перегудов О.А.** Изменение структуры и фазового состава поверхности 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации 826
- Данилов В.И., Горбатенко В.В., Зувев Л.Б., Орлова Д.В., Данилова Л.В.** Исследование деформации Людерса в малоуглеродистой стали 831
- Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Петрикова Е.А., Абзаев Ю.А., Иванова О.В.** Структура и свойства поверхности высокохромистых сталей, модифицированных интенсивным импульсным электронным пучком 839

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б.** Влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке на энергоемкость процесса дробления 846
- К 60-летию Евгения Валентиновича Протопопова 849**
- Громову Виктору Евгеньевичу – 70 лет 851**

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- V.N. Shinkin** Simplified method for calculation of bending moments of steel sheet and reactions of working rollers in multiroll straightening machine 777
- N.A. Kozyrev, A.A. Usol'tsev, R.A. Shevchenko, R.E. Kryukov, P.E. Shishkin** Modern welding methods of the rails of new generation 785

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- A.S. Vodoleev, V.A. Androkhonov, O.V. Berdova, N.A. Yumasheva, E.S. Cherdantseva** Environmentally safe storage of wastes from iron-ore enrichment 792

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- V.V. Stulov, A.V. Aldunin** Production technology of hot rolled plate of specified quality using new technics of large section slabs casting ... 798
- A.A. Umanskiy, A.V. Golovatenco, V.N. Kadykov** Development of theoretical basis of determining energy-power parameters of rolling with development of new grades of rail steel 804

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- V.V. Solonenko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V. Temlyantsev, N.F. Yakushevich** Thermodynamic justification of opportunity of using high-temperature combustion flanks for oxidation of melt impurities in aggregates of converter type. Report 2. Interaction of the flank with metal and slag in the converter bath 811
- Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Upolovnikova A.G., Kel' I.N.** Study of the viscosity of slags of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ system 820

MATERIAL SCIENCE

- A.A. Yur'ev, V.E. Gromov, K.V. Morozov, O.A. Peregudov** Changes in structure and phase composition of the surface of differentially hardened 100-meter rails in operation 826
- V.I. Danilov, V.V. Gorbatenko, L.B. Zuev, D.V. Orlova, L.V. Danilova** Investigation of Lüders deformation in the mild steel 831
- Yu.F. Ivanov, A.A. Klopotov, E.A. Petrikova, Yu.A. Abzaev, O.V. Ivanova** Structure and properties of the surface of high-chromium steels modified with an intense pulsed electron beam 839

SHORT REPORTS

- A.G. Nikitin, Yu.A. Epifantsev, K.S. Medvedeva, P.B. Gerike** Influence of friction coefficient between the crushed material and the cheek in one-roll crusher on crushing process energy capacity 846
- To the 60th Anniversary of Eugeni Valentinovitch Protopopov 849**
- To the 70th Anniversary of Viktor Evgen'evitch Gromov 851**

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ КОНСЕРВАЦИЯ ОТХОДОВ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Водолеев А.С.¹, д.с/х.н., профессор кафедры теплоэнергетики
и экологии (botanik-egf@yandex.ru)

Андроханов В.А.², д.биол.н., зам. директора по научной работе,
заведующий лабораторией (androhan@rambler.ru)

Бердова О.В.¹, ст. преподаватель кафедры открытых горных работ
и электромеханики (olgaberдова1810@mail.ru)

Юмашева Н.А.¹, ст. методист Учебного центра охраны труда
и пром. безопасности (vegunata@mail.ru)

Черданцева Е.С.³, преподаватель (cherdantseva86@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

² Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
(630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2)

³ Новокузнецкий торгово-экономический техникум
(654041, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кутузова, 84)

Аннотация. Рекультивация включает в себя комплекс мероприятий, направленных на формирование на поверхности промышленных отвалов благоприятного корнеобитаемого слоя различными способами с последующим использованием этой площади. Консервация – это закрепление поверхности отвалов механическим путем или путем озеленения поверхности отвалов при предварительном нанесении минимального слоя почвы, торфа, минеральных удобрений, ростовых веществ, нетрадиционных почвоулучшителей – осадков сточных вод (ОСВ). В результате проведенных работ на поверхности отходов железорудного обогащения обогатительной Абагурской агломерационной фабрики были сформированы техноземы – искусственные почвы с корнеобитаемым слоем, состоящим из смеси ОСВ и материала хвостохранилищ. Созданы рекультивированные участки на отходах железорудного обогащения, которые обеспечивают эрозионную устойчивость поверхности хвостохранилищ и консервацию отходов обогащения. Химические и агрохимические параметры техноземов на протяжении двух лет их развития изменились. Наблюдается некоторое подщелачивание среды и резкое снижение содержания в субстрате корнеобитаемого слоя, количества органического вещества и всех форм азота. Биомониторинг рекультивированных опытных площадок позволяет оптимизировать и ускорить процесс формирования культурфитоценозов на отходах промышленного производства, следить за состоянием и развитием травостоя, отслеживать процесс восстановления плодородия нарушенных земель, рассчитывать экологический и экономический эффект проводимых рекультивационных работ. По результатам мониторинга опытных участков на территории хвостохранилищ обогатительной Абагурской агломерационной фабрики установлено, что через 2 – 3 года создаются благоприятные условия для формирования на субстрате хвостохранилища корнеобитаемого слоя и устойчивого культурфитоценоза. В результате внесения ОСВ происходит улучшение физического и питательного режимов на поверхности хвостохранилища. Во всех вариантах способов размещения ОСВ достигнут положительный эффект – рост наземной биомассы с увеличением нормы внесения ОСВ. Показана почвенно-экологическая перспективность использования ОСВ в качестве мелиоранта, существенно улучшающего химико-физические свойства промышленных отвалов, что позволяет создавать долговременные, устойчивые фитоценозы защитного и санитарно-гигиенического назначения.

Ключевые слова: рекультивация, консервация, отходы железорудного обогащения, биомониторинг, корнеобитаемый слой, культурфитоценоз, техноземы, фитотоксичность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-792-797

Любая нарушенная территория техногенного происхождения проходит в своем развитии две фазы – техногенного формирования и посттехногенного развития [1 – 5]. Ведущими механизмами трансформации техногенных ландшафтов в естественные являются биологические процессы, приводящие к восстановлению и развитию биогеоценоза. Формирование ценозов любого уровня определяется почвенно-экологической эффективностью рекультивации, которая зависит от уровня использования ресурсов рекультивации. В свя-

зи с различными целями рекультивации применяются те или иные технологии, направленные на создание условий развития почвенно-биологических процессов на нарушенных территориях.

Биомониторинг рекультивированных опытных площадок позволяет оптимизировать и ускорить процесс формирования культурфитоценозов на отходах промышленного производства, следить за состоянием и развитием травостоя, отслеживать процесс восстановления плодородия нарушенных земель, прогнозиро-

вать и направлять развитие сукцессионных процессов на рекультивируемых территориях в наиболее целесообразном направлении, рассчитать экологический и экономический эффект проводимых рекультивационных работ.

В настоящее время в Кузбассе и других промышленно развитых регионах под отвалы отходов производства заняты огромные площади плодородных земель, многие из которых могут находиться вблизи населенных пунктов. При этом складированные отходы наносят огромный экологический ущерб окружающей природной среде и негативно влияют на условия проживания населения. Нейтрализовать их вредное воздействие можно несколькими путями: утилизацией, рекультивацией или консервацией.

Утилизация – это вторичное использование промышленных отходов в хозяйственной деятельности человека. Рекультивация включает в себя комплекс мероприятий, направленных на формирование на поверхности промышленных отвалов благоприятного корнеобитаемого слоя различными способами, например, путем нанесения потенциально плодородных и плодородных слоев почвы мощностью до 1 м с последующей эксплуатацией этой площади под земледелие или другие виды использования [6]. Консервация – это закрепление поверхности отвалов механическим путем (нанесение пленок, асфальтирование, покрытие щебенкой и др.) или путем озеленения поверхности отвалов [7 – 9] при предварительном нанесении минимального слоя почвы, торфа, минеральных удобрений, ростовых веществ, нетрадиционных почвоулучшителей – осадков сточных вод (ОСВ) и пр. [10 – 15].

Исследования проводились на хвостохранилище Абагурской обогатительной агломерационной фабрики, которая находится в г. Новокузнецке и является крупным промышленным объектом, деятельность которого в значительной степени осложняет и ухудшает экологические условия окружающей среды и негативно влияет на экологию города и прилегающие ландшафты. Ее обширные хвостохранилища заполнены песчано-суглинистыми субстратами и постоянно подвергаются водной и ветровой эрозии, загрязняя атмосферу, почву и воду.

В то же время складированные отходы являются субстратом, содержащим достаточно много ценных элементов, которые в дальнейшем при обработке технологий будут переработаны. Поэтому такие хвостохранилища можно рассматривать как техногенные месторождения [16]. По этой причине коренные рекультивационные работы на этих техногенных объектах нецелесообразны, необходимо и достаточно закрепить их поверхность биологическими методами путем формирования санитарно-защитных насаждений.

Согласно технологической схеме на Абагурской аглофабрике отходы производства – хвосты магнитной сепарации – в количестве до 2,2 млн. т в год железной

руды по пульпопроводу направляются в хвостохранилища. В настоящее время три хвостохранилища занимают площадь более 350 га. Хвостохранилище № 3 действующее, а № 1 и № 2 представляют собой два обособленных плато высотой до 20 м общей площадью около 190 га. Запас складированных в них хвостов оценивается примерно в 100 млн. т. По своему химическому составу и свойствам хвосты могут быть отнесены к промышленному сырью с широким спектром возможного применения. В настоящее время исследуется технология извлечения полезных элементов из складированных и текущих хвостов методами гравитационного обогащения, плазменной обработки и др. Крупнотоннажная переработка на протяжении 30 лет существования хвостохранилища № 1 не организована.

Для организации рекультивационных работ возможно использовать классификацию нарушенных территорий, которая учитывает специфику техногенных объектов и определяет направление практических мероприятий по восстановлению такого типа нарушений. Согласно классификации промышленных отвалов по В.В. Тарчевскому [17], этот промышленный объект по происхождению относится к отвалам перерабатывающей промышленности наливного типа; по возрасту – средневозрастной (свыше 25-ти лет); по форме – чашевидный; по высоте – средний (до 25 м); по механическому составу поверхностного субстрата состоит из крупной пыли и песка (частицы до 0,1 мм); по кислотности (рН) – кислый; по утилизации – неиспользуемый.

Хвостохранилище заполнено при помощи гидротранспорта, что привело к дифференциации материала по гранулометрическому составу. В почвенно-экологическом отношении материал отработанных хвостохранилищ характеризуется очень высокой неоднородностью практически всех химических, физико-химических, агрофизических и агрохимических параметров. Эта неоднородность определяется спецификой технологии формирования гидроотвалов, которая дифференцирует материал как по площади гидроотвала, так и в его толще. Высокая плотность 1,7 г/см³ и выше делает этот субстрат практически корненепроницаемым, резко снижает объем порового пространства и водопроницаемость. По этой причине при рекультивации хвостохранилищ необходимо введение специального технологического элемента, снижающего эту плотность, например, смешивание с другими менее плотными субстратами.

Вследствие мелкофракционного состава и значительных масштабов занимаемой ими территории (350 га) субстрат хвостохранилищ практически полностью лишен растительности и подвержен ветровой эрозии, что оказывает негативное воздействие на биогеоценоз близлежащих территорий. В районе пос. Елань годовое выпадение пыли составляет 409 г/м², что более чем в 200 раз превышает фоновый показатель для ле-

состепненной зоны (2 мг/м²). В радиусе 8 км вокруг Абагурской аглофабрики отмечено загрязнение почв, в том числе железом в 3 – 3,5 раза выше фона [18].

Субстрат хвостохранилищ относится к категории сильно засоленных, фитотоксичных. При этом степень фитотоксичности достигает очень высоких значений. Факторами фитотоксичности выступают хлориды и сульфаты. Долевое участие этих солей примерно одинаково. Хвосты отнесены к 4 классу токсичности.

Основными причинами, препятствующими естественному зарастанию поверхности хвостохранилища, являются:

- фитотоксичность, обусловленная засолением поверхности;
- высокая плотность сложения субстрата;
- низкое содержание элементов питания растений;
- неблагоприятные микроклиматические условия, такие как высокая температура в летний период, незначительное накопление снегового покрова зимой, ветровая эрозия, которая не только выносит материал хвостохранилища, но повреждает молодые побеги и листья растений песчаными частицами.

Фитотоксичность пород в сочетании с их высокой плотностью являются основными причинами длительного существования техногенной пустыни хвостохранилища.

Для формирования почвенно-растительного слоя необходима технология рекультивации, позволяющая улучшить условия на поверхности хвостохранилища и обеспечить долгосрочное функционирование фитоценоза в данных микроклиматических условиях. Успешная рекультивация возможна при создании благоприятного корнеобитаемого слоя путем внесения органо-минеральных смесей в процессе технического этапа и последующей биологической рекультивации, т.е. создания устойчивых культурфитоценозов для предотвращения эрозии и загрязнения окружающих территорий [19, 20]. Создание травяного покрова на поверхности хвостохранилищ коренным образом улучшит ситуацию с обеспечением снегонакопления зимой, что в совокупности с фактором присутствия органического субстрата повысит эффективность восстановления почвенно-растительного слоя на поверхности хвостохранилища.

Известно, что наиболее рациональным способом восстановления органической составляющей отвалов является размещение на их поверхности плодородного слоя почвы (ПСП), снятого при строительстве новых отвалов. Этот способ был применен для рекультивации склонов хвостохранилища № 2. При этом был использован ПСП, снятый с территории хвостохранилища № 3. Но этого материала недостаточно для всех площадей, требующих рекультивации.

Поэтому для создания корнеобитаемого слоя на поверхности хвостохранилища был использован осадок сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений. В результате проведенных работ на поверхности были

сформированы техноземы – искусственные почвы с корнеобитаемым слоем, состоящим из смеси ОСВ и материала хвостохранилища. Ниже представлены результаты исследования свойств и режимов техноземов опытных площадок, заложенных на Абагурском хвостохранилище № 1.

Целью создания техноземов было исследование двух почвенно-экологических эффектов. Во-первых, необходимо было выяснить, как влияет резкая дифференциация профиля технозема на два слоя с различным их гранулометрическим составом на восстановление почвенных функций и, соответственно, на биологическую продуктивность, во-вторых, выяснить влияние на эти же параметры различной мощности нанесения слоя ОСВ.

Варианты техноземов включали три серии (А-1, А-2, А-3), которые различались друг от друга количеством внесенного ОСВ (мощностью 30, 20 и 10 см соответственно).

Ранее было показано [16], что первым, лимитирующим развитие формируемого культурфитоценоза во всех вариантах опытов, фактором является фитотоксичность пород хвостохранилищ и ОСВ по хлоридам и сульфатам. В случае с вариантами техноземов, относящимся к серии А и имеющих дифференцированный по породам профиль, фитотоксичность пород корнеобитаемого слоя обусловлена солями, содержащимися в ОСВ, а в нижележащем – пород хвостохранилищ. Прогнозировалось, что предварительное перепахивание поверхности хвостохранилища и рыхлое сложение свежееотсыпанного ОСВ создадут условия для самомелиорации субстрата в корнеобитаемом слое. Исследования, проведенные в течение двух лет вегетации бобовых трав и, следовательно, развития почвенных режимов и почвенно-экологических функций, подтвердили этот прогноз.

Результаты анализа солевого состава водной вытяжки, полученной из субстрата корнеобитаемого слоя техноземов рассматриваемого опыта, показывают, что степень фитотоксичности резко сократилась (см. табл. 1). Этому способствовало снижение доли плотного остатка и понижение концентрации в растворах хлоридов и сульфатов, в первую очередь магния и натрия. Необходимо обратить внимание на то, что в различных техноземах этого варианта степень снижения концентрации фитотоксичных солей различная. Наибольшей она оказалась в серии А-1, наименьшей – в А-3. Иными словами, чем меньше мощность слоя ОСВ, тем выше скорость выщелачивания солей.

Однако из этого не следует, что 30-см мощность слоя ОСВ оказывается излишней. Во-первых, и при такой мощности фитотоксичность субстрата снизилась существенно – до уровня, не препятствующего удовлетворительному развитию культурфитоценоза. Во-вторых, есть основания полагать, что процесс выщелачивания солей будет продолжаться и далее, и при

Сравнительный анализ водной вытяжки техноземов в корнеобитаемом слое

Table 1. Comparative analysis of water extracts of techno-soils in the root layer

Вариант	Плотный остаток, %	Содержание, мг·экв/100 г						Токсичность	
		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Первый год опыта									
A-1	1,731	0,72	1,00	16,12	14,65	1,57	1,62	3,3	0,2
A-2	1,646	0,81	1,20	15,62	14,21	1,86	1,56	4,0	0,2
A-3	1,753	0,76	0,98	16,52	14,75	1,52	1,99	3,2	0,3
Второй год опыта									
A-1	1,006	0,96	0,52	7,59	7,23	1,23	0,61	1,7	0
A-2	1,070	1,00	0,65	8,16	9,50	1,36	1,05	2,2	0
A-3	1,125	1,28	0,70	9,45	10,73	1,45	0,75	2,3	0,1

сохранении этого режима выщелачивания процессы оптимизации солевого режима технозема охватят всю толщу корнеобитаемого слоя. В-третьих, одной из важнейших целей проводимого эксперимента является решение проблемы размещения ОСВ. Поэтому в перспективе в почвенно-экологическом плане значительно важнее не допустить развития процессов вторичного засоления, которое может проявиться вполне реально при условии почвенной засухи, и вторичного уплотнения субстрата в корнеобитаемом слое, при любой мощности ОСВ.

После двух лет саморазвития почвенно-экологических функций в техноземах изменились и параметры, характеризующие физическое состояние субстрата в корнеобитаемом слое, заметно возросла плотность сложения, снизилась порозность (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ основных физических свойств техноземов

Table 2. Comparative analysis of the main physical properties of techno-soils

Вариант	Плотность твердой фазы, г/см ³	Плотность сложения, г/см ³	Порозность, %
Первый год опыта			
A-1	2,28	0,68	70,2
A-2	2,20	0,73	66,8
A-3	2,25	0,80	64,4
Второй год опыта			
A-1	2,33	1,03	55,8
A-2	2,58	1,18	54,3
A-3	2,70	1,05	61,1

Несмотря на это, названные физические параметры остаются в границах, близких к оптимальным, а само по себе уплотнение следует считать следствием естественной просадки. В плане дальнейших мониторинговых исследований важно проследить, на каком уровне плотности сложения останутся просадочные процессы и не выйдут ли они за границы зоны оптимума. Прогнозируя, можно предположить, что просадочные явления будут продолжаться до тех пор, пока в корнеобитаемом слое техноземов не начнут развиваться активные гумусоаккумулятивные процессы. На современной стадии развития техноземов мощность отсыпанного слоя ОСВ практически не влияет на интенсивность просадочных явлений.

Химические и агрохимические параметры техноземов по истечении двух лет их развития изменились (табл. 3). Отмечается некоторое подщелачивание среды (значения pH возрастают) и резкое снижение содержания в субстрате корнеобитаемого слоя количества органического вещества и всех форм азота.

Таблица 3

Основные химические и агрохимические параметры техноземов Абагурского хвостохранилища после 2-х лет вегетации многолетних трав

Table 3. Main chemical and agrochemical parameters of techno-soils from Abagur tailings dump after 2 years of vegetation of perennial grasses

Вариант	pH	C, %	Содержание подвижных форм, мг/100г субстрата			
			NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	K ₂ O	P ₂ O ₅
A-1	7,61	3,5	3,5	7,1	32,8	40,9
A-2	7,66	4,1	3,2	6,4	33,0	38,5
A-3	7,28	5,8	5,3	3,0	32,7	41,2

Необходимо отметить необычно высокую интенсивность процессов минерализации органических веществ, содержащихся в ОСВ, и потерь различных форм азота. Однако впоследствии при развитии устойчивого фитоценоза на рекультивированных участках установится определенный баланс процессов гумификации и минерализации органических веществ, что также будет способствовать стабилизации содержания азотных веществ в корнеобитаемом слое техноземов.

Выводы. Исследования показали, что без проведения рекультивационных мероприятий создание устойчивого фитоценоза и формирование в субстрате хвостохранилища корнеобитаемого слоя, препятствующего развитию водной и ветровой эрозией, невозможно. Установлена перспективность использования осадков сточных вод в качестве субстрата, существенно улучшающего химико-физические свойства пород. Практически на всех опытных площадках отмечается заметное снижение напряженности режимов функционирования сформированных культурфитоценозов. В результате внесения ОСВ происходит улучшение физического и питательного режимов на поверхности хвостохранилища. Во всех вариантах способов размещения ОСВ достигнут положительный эффект – рост наземной биомассы бобовых растений с увеличением нормы внесения ОСВ. Таким образом, при нанесении ОСВ достигается поставленная цель рекультивации – создание устойчивого фитоценоза на поверхности хвостохранилища и прекращение переноса загрязняющих веществ на прилегающие территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евилевич А.З., Евилевич М.А. Утилизация осадков сточных вод. – Л.: Стройиздат, 1988. – 248 с.
2. Андроханов В.А., Двуреченский В.Г., Клековкин С.Ю., Водолеев А.С., Кудашкина С.А., Степнов А.А. Технология рекультивации отходов железорудного обогащения с использованием осадков сточных вод // Проблемы региональной экологии. 2006. № 5. С. 33 – 38.
3. Галанина Т.В. Рекультивация в Кузбассе: проблемы и пути решения // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2007. № 1. С. 22 – 24.
4. Курачев В.М., Андроханов В.А., Двуреченский В.Г. Теоретические основы рекультивации нарушенных земель // Биологическая рекультивация нарушенных земель: Материалы Международного совещания, Екатеринбург, 3 – 7 июня 2002 г. – Екатеринбург, 2003. С. 239 – 247.
5. Трофимов С.С. Экология и почвенные ресурсы Кемеровской области. – Новосибирск: Наука, 1975. – 300 с.
6. Bush P.W. Spoiled lands to the south-east of Leeds // Proceedings of the Derelict Land Symposium, 1969. P. 21 – 28.
7. Alter J.H. Chicagos program for using sludge to reclaim land // Com-post sci., 1976. Vol. 17. P. 22 – 24.
8. Aoki M., Ichii H. Sewage sludge use in agriculture and evaluation of composting facilities // Trans. 14 th Int. Congr. Soil Sci., Kyoto, Aug. 1990. Vol. 4. Commis. 4.- Kyoto, 1990. P. 210 – 215.
9. Clapp C.E., Dowdy R.H., Larson W.E., Linden D.R., Normann C.M., Halbach T.R., Polta R.C. Utilization of municipal sewage sludge on agricultural land in Minnesota // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. Cincinnati, 1993. P. 312.
10. Водолеев А.С., Степнов А.А., Кудашкина С.А. Перспективы технологии использования осадков сточных вод для рекультивации // Проблемы экологии и здоровья промышленных городов и пути их решения. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2004. С. 28 – 31.
11. Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Нестерович И.А., Фомкина Т.П. Агроэкологическая оценка использования осадка сточных вод // Агрохимия. 1995. № 5. С. 102 – 108.
12. Beaver S.H. The Black Country // In Myers J. Staffordshire, part 61 of The Land of Britain. 1946. P. 146 – 152.
13. Boyle Michael. Biodegradation of land-applied sludge // J. Environ. Qual. 1990. Vol. 19. No. 4. P. 640 – 644.
14. Diaz L.T. Golneke C.G. Co-composting refuse and sludge // Bio Cycle. 1984. Vol. 25. No. 4. P. 21 – 25.
15. Hooda P.S., Alloway B.J. Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludged soils // Water, Air, and Soil Pollut. 1994. Vol. 74. No. 3 – 4. P. 235 – 250.
16. Водолеев А.С., Степнов А.А., Кудашкина С.А. Результаты комплексной оценки биологической рекультивации техногенных ландшафтов с использованием осадков сточных вод // Биологическая рекультивация нарушенных земель: Материалы Международного совещания, Екатеринбург, 3 – 7 июня 2002 г. – Екатеринбург, 2003. С. 41 – 51.
17. Тарчевский В.В. Классификация промышленных отвалов // Растительность и промышленные загрязнения: Охрана природы на Урале. 1970. Вып. 7. С. 84 – 89.
18. Романенко М.Ф. Экология Кузбасса. Проблемы и перспективы. – Новокузнецк: изд. КемГУ, 1992. – 78 с.
19. Beaver S.H. The Potteries: a study in the evolution of cultural landscape // Transactions and Papers, Institute of British Geographers. 1964. No. 34. P. 1 – 31.
20. Charter R.A., Tabatabai M.A., Hemming S.J. Phytoavailability of metals from sewage sludges and their humate base counterparts added to soils // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. Cincinnati, 1993. P. 269.

Поступила 26 апреля 2017 г.

ENVIRONMENTALLY SAFE STORAGE OF WASTES FROM IRON-ORE ENRICHMENT

A.S. Vodoleev¹, V.A. Androkhonov², O.V. Berdova¹,
N.A. Yumasheva¹, E.S. Cherdantseva³

¹ Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

² Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS, Russia, Novosibirsk

³ Novokuznetsk Trade and Economic College, Russia, Novokuznetsk

Abstract. Recultivation includes a set of measures aimed at forming of a favorable root layer on the surface of industrial dumps in various ways with subsequent use of this area. Conservation is the fixation of dumps surface by mechanical means or by gardening the surface of the dumps with a preliminary application of a minimum layer of soil, peat, mineral fertilizers, growth substances and unconventional soil improvers – sewage sludge (WWS). As a result of the work carried out on the surface of the iron ore enrichment waste of the Abagur

agglomeration factory, techno-soils were formed – artificial soils with a root layer consisting of a mixture of WWS and tailing material. Recultivated areas have been created on iron ore enrichment waste, which ensure erosion stability of the tailing dump surface and conservation of enrichment wastes. The chemical and agrochemical parameters of techno-soils over the two years of their development have changed. Some alkalization of the medium and a sharp decrease in the amount of organic matter and all forms of nitrogen in substrate of the root layer are observed. Biomonitoring of recultivated experimental sites makes it possible to optimize and to accelerate the process of crop plants formation on industrial waste, to monitor the condition and development of the grass stand, to monitor the restoration of fertility of disturbed lands and to calculate the ecological and economic effect of reclamation works. Based on the results of monitoring of experimental sites in the tailing dumps of the Abagur agglomeration plant, it was established that in 2 to 3 years favorable conditions are created for the formation of a root layer on the substratum of the root layer and a stable crop-forming phytocenosis. As a result of introducing WWS, the physical and nutritional regimes on the surface of the tailing pond are improved. In all variants of WWS placement a positive effect has been achieved – the growth of terrestrial biomass with an increase in the rate of introduction of WWS. The soil-ecological perspective of the use of sewage sludge as an ameliorant that significantly improves the chemical-physical properties of industrial dumps is shown, which makes it possible to create long-term, stable phytocenoses of protective and sanitary-hygienic purposes.

Keywords: recultivation, conservation, waste of iron ore enrichment, biomonitoring, root layer, culture phytocenosis, techno-soils, phytotoxicity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-792-797

REFERENCES

1. Evilevich A.Z., Evilevich M.A. *Utilizatsiya osadkov stochnykh vod* [Utilization of sewage sludge]. Leningrad: Stroiizdat, 1988, 248 p. (In Russ.).
2. Androkhonov V.A., Dvurechenskii V.G., Klekovkin S.Yu., Vodoleev A.S., Kudashkina S.A., Stepnov A.A. Technology of recultivation of wastes of iron-ore enrichment with the use of sewage sludge. *Problemy regional'noi ekologii*. 2006, no. 5, pp. 33–38. (In Russ.).
3. Galanina T.V. Recultivation in Kuzbass: problems and solutions. *Ispol'zovanie i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2007, no. 1, pp. 22–24. (In Russ.).
4. Kurachev V.M., Androkhonov V.A., Dvurechenskii V.G. Theoretical basis for recultivation of disturbed lands. In: *Biologicheskaya rekul'tivatsiya narushennykh zemel': Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya, Ekaterinburg, 3 – 7 iyunya 2002* [Biological recultivation of disturbed lands: Materials of the International Meeting, Ekaterinburg, June 3-7, 2002]. Ekaterinburg, 2003, pp. 239–247. (In Russ.).
5. Trofimov S.S. *Ekologiya i pochvennyye resursy Kemerovskoi oblasti* [Ecology and soil resources of Kemerovo region]. Novosibirsk: Nauka, 1975, 300 p. (In Russ.).
6. Bush P.W. Spoiled lands to the south-east of Leeds. *Proceedings of the Derelict Land Symposium*. 1969, pp. 21–28.
7. Alter J.H. Chicago's program for using sludge to reclaim land. *Com-post sci*. 1976, vol. 17, pp. 22–24.
8. Aoki M., Ichii H. Sewage sludge use in agriculture and evaluation of composting facilities. *Trans. 14 th Int. Congr. Soil Sci., Kyoto, Aug. 1990*, vol. 4. Commis. 4.- Kyoto, 1990, pp. 210–215.
9. Clapp C.E., Dowdy R.H., Larson W.E., Linden D.R., Normann C.M., Halbach T.R., Polta R.C. Utilization of municipal sewage sludge on agricultural land in Minnesota. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. Cincinnati*, 1993, pp. 312.
10. Vodoleev A.S., Stepnov A.A., Kudashkina S.A. Prospects of the technology of using sewage sludge for recultivation. In: *Problemy ekologii i zdorov'ya promyshlennykh gorodov i puti ikh resheniya* [Problems of ecology and health of industrial cities and ways of their solution]. Novokuznetsk: SibGIU, 2004, pp. 28–31. (In Russ.).
11. Merzlaya G.E., Ziyabkina G.A., Nesterovich I.A., Fomkina T.P. Agroecological assessment of the use of sewage sludge. *Agrokhi-miya*. 1995, vol. 5, pp. 102–108. (In Russ.).
12. Beaver S.H. The Black Country. In Myers J. *Staffordshire*, part 61 of *The Land of Britain*. 1946, pp. 146–152.
13. Boyle Michael. Biodegradation of land-applied sludge. *J. Environ. Qual.* 1990, vol. 19, no. 4, pp. 640–644.
14. Diaz L.T. Golneke C. G. Co-composting refuse and sludge. *Bio Cycle*. 1984, vol. 25, no. 4, pp. 21–25.
15. Hooda P.S., Alloway B.J. Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludged soils. *Water, Air and Soil Pollut.* 1994, vol. 74, no. 3–4, pp. 235–250.
16. Vodoleev A.S., Stepnov A.A., Kudashkina S.A. Results of a comprehensive assessment of biological recultivation of man-made landscapes using wastewater sludge. In: *Biologicheskaya rekul'tivatsiya narushennykh zemel': Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya, Ekaterinburg, 3 – 7 iyunya 2002 g.* [Biological recultivation of disturbed lands: Materials of the International Meeting, Ekaterinburg, June 3-7, 2002]. Ekaterinburg, 2003, pp. 41–51. (In Russ.).
17. Tarchevskii V.V. Classification of industrial dumps. *Rastitel'nost' i promyshlennyye zagryazneniya: Okhrana prirody na Urale*. 1970, vol. 7, pp. 84–89. (In Russ.).
18. Romanenko M.F. *Ekologiya Kuzbassa. Problemy i perspektivy* [Ecology of Kuzbass. Problems and prospects]. Novokuznetsk: KemGU, 1992, 78 p. (In Russ.).
19. Beaver S.H. The Potteries: a study in the evolution of cultural landscape. *Transactions and Papers, Institute of British Geographers*. 1964, no. 34, pp. 1–31.
20. Charter R.A., Tabatabai M.A., Hemming S.J. Phytoavailability of metals from sewage sludges and their humate base counterparts added to soils. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet. Cincinnati*, 1993, 269 p.

Information about the authors:

A.S. Vodoleev, Dr. Sci. (Agr), Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (botanik-egf@yandex.ru)
V.A. Androkhonov, Dr. Sci. (Biological), Deputy Director for Research, Head of the Laboratory (androhan@rambler.ru)
O.V. Berdova, Senior Lecturer of the Chair of Open-cast Mining and Electromechanics (olgaberdova1810@mail.ru)
N.A. Yumasheva, Senior Methodist of the Labor Safety Training Center and Industrial Security (vegunata@mail.ru)
E.S. Cherdantseva, Lecturer (cherdantseva86@mail.ru)

Received April 26, 2017

УДК 621.77.04

О ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕКАТАНОГО ЛИСТА ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ РАЗЛИВКИ СЛЯБОВ БОЛЬШОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Стулов В.В., д.т.н., профессор кафедры «Технологии и оборудование прокатки» (stuvv@inbox.ru)

Алдушин А.В., д.т.н., профессор кафедры «Технологии и оборудование прокатки»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Баумана)
(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)

Аннотация. Разработка новых методов получения непрерывнолитых слябовых заготовок не может базироваться на равновесных процессах кристаллизации стали, идущих с малой скоростью. Использование подачи расплава в пристеночные слои стенок кристаллизатора через напорную конструкцию погружного стакана с эксцентричными выходными отверстиями позволяет при разливке слябов добиться существенного увеличения скорости кристаллизации стали. Приведены основные результаты разливки слябов большого поперечного сечения по новой технологии, обеспечивающей улучшение их качества. При разливке стали через опытный стакан наблюдается значительное уменьшение ширины зоны столбчатых кристаллов и увеличение зоны разориентированных кристаллов, а также уменьшение балла осевой ликвации. При разливке по новой технологии теплообмен в кристаллизаторе увеличивается на 10 – 12 %. При испытании на ударную вязкость выявлен ряд качественных характеристик металла, которые не улавливаются при других видах испытаний. Основные закономерности формирования структуры металла в условиях непрерывной чистой группы непрерывного широкополосного стана (НШС) и последующего охлаждения изучали с использованием метода физического моделирования. Клиновидные образцы из низкоуглеродистой стали промышленной плавки, отобранные от охлажденного на промежуточном рольганге НШС подката, прокатывали в один и два прохода на двухвалковом скоростном лабораторном стане с обводным устройством. При этом соблюдали геометрическое и кинематическое подобие процесса прокатки. Прокатанные образцы после фиксированных выдержек на воздухе сбрасывались специальным устройством на боковое ребро для частичной закалки в охлаждающем растворе. По длине образца получали набор относительных обжатий, а по его ширине – набор скоростей охлаждения. По результатам физического моделирования установлены основные закономерности формирования структуры низкоуглеродистой стали при прокатке и ускоренном охлаждении полос на непрерывном широкополосном стане. С использованием данных закономерностей и уравнения Холла-Петча можно обеспечивать заданные структуру и предел текучести материала готового горячекатаного листа. За счет исключения дополнительного нагрева слябов под прокатку и повышения качества проката может быть получен значительный экономический эффект.

Ключевые слова: непрерывная разливка, кристаллизация, сляб, непрерывный широкополосный стан, физическое моделирование, низкоуглеродистая сталь, структура, теплообмен.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-798-803

В настоящее время в нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется строительству мини-заводов, включающих литейно-прокатные агрегаты (ЛПА), для разливки тонких слябов и сортовых заготовок с последующей их непрерывной прокаткой, а также совершенствованию технологий и используемого оборудования [1 – 4].

На отечественных металлургических комбинатах (АО «Северсталь», «ММК», «НЛМК» и др.), построенных в 60 – 70-х годах прошлого века и выпускающих стальные слябовые заготовки больших поперечных сечений (200 – 350) × (1600 – 2500) мм, используется технология, включающая отдельные операции получения слябов, их остывание и нагрев для последующей прокатки.

Вопросу качества получаемых слябов, в частности причинам образования продольных и поперечных трещин, уделяется значительное внимание [5, 6].

Непосредственно с качеством слябов связаны вопросы теплообмена в кристаллизаторе и охлаждения металла [7, 8], а также состав шлакообразующих смесей [9, 10].

Погружной разливочный стакан, используемый при непрерывной разливке, с позиции качества литой заготовки является одним из важнейших функциональных огнеупорных изделий [11]. В последние годы в области непрерывной разливки, помимо традиционных требований высокого качества продукта и высокой производительности, большое значение приобретает также задача оптимизации потока жидкой стали в кристаллизаторе, решаемая с использованием результатов моделирования [12 – 15].

Известно [1], что разработка новых методов получения непрерывнолитых слябовых заготовок не может базироваться на равновесных процессах кристаллизации стали, идущих с малой скоростью. Использование

новых технологических приемов, заключающихся в подаче расплава в пристеночные слои стенок кристаллизатора через напорную конструкцию погружного стакана с эксцентричными выходными отверстиями, позволяет при разливке слябов добиться существенно-го увеличения (до 50 %) скорости кристаллизации стали на расстоянии до 40 – 50 мм от поверхности заготовки по сравнению с существующей разливкой стали по центру кристаллизатора через безнапорные погружные стаканы [16].

Подача расплава в пристеночные слои кристаллизатора приводит к большему его переохлаждению по сравнению с переохлаждением при подаче расплава в центр кристаллизатора (рис. 1).

На рис. 2 приведены серные отпечатки макроструктуры слябовых заготовок, отлитых через опытный стакан с эксцентричными выходными отверстиями и подачей расплава в пристеночные слои кристаллизатора, а также через существующий стакан с подачей расплава по центру кристаллизатора. Из сравнения серных отпечатков по рис. 2, а, б следует, что при разливке стали через опытный стакан наблюдается значительное уменьшение (более чем в 1,5 раза) ширины зоны столбчатых кристаллов и увеличение зоны разориентированных кристаллов, а также уменьшение на 1,0 – 1,5 балла осевой ликвации. Выявлены зоны конвективного влияния протяженностью 450 – 600 мм по обеим широким граням заготовки, состоящие из разориентированных мелких кристаллов с длиной осей 2 – 10 мм [17]. Описанная картина относится ко всем разливаемым сталям.

При разливке стали по новой технологии теплообмен в кристаллизаторе увеличивается на 10 – 12 % [18]. Средние значения ударной вязкости (KCU , Па/с) в стальном прокате на 11 – 31 % превышают значения для стального проката, полученного из слябов, разлитых по традиционной технологии [16, 19].

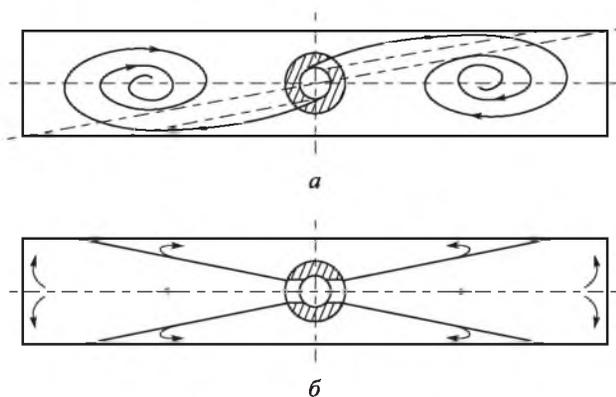


Рис. 1. Схема течения жидкой стали в горизонтальной плоскости кристаллизатора:

а – разливка через новый напорный стакан с эксцентричными выходными отверстиями; б – разливка через существующий стакан

Fig. 1. Liquid steel flow diagram in horizontal plane of the crystallizer: а – casting through a new head nozzle with eccentric outlets; б – casting through an existing glass

Испытанием на ударную вязкость выявляется ряд качественных характеристик металла (степень разнородности, отпускная хрупкость и др.), которые не удастся определить при других видах испытаний. Ударная вязкость является наиболее распространенной характеристикой сопротивления металла при жестких условиях динамического нагружения. Однако улучшения структуры непрерывнолитого сляба еще недостаточно для обеспечения высокого качества готового горячекатаного листа. В процессе прокатки на современном непрерывном широкополосном стане (НШС) и ЛПА существенное влияние на структуру и физико-механические свойства металла оказывают условия прокатки в непрерывной чистовой группе и последующего охлаждения полосы [20 – 25].

В последние годы все большее значение придается методам физического моделирования условий структурообразования стали при дробной горячей деформации применительно к условиям НШС. В работах [26 – 28] и других с помощью скоростных пластометров сделаны попытки изучения процессов разупрочнения и структурообразования при неоднократном растяжении, осадке или скручивании стальных образцов при высоких температурах. Такие эксперименты моделируют силовые условия прокатки полос, но не позволяют изучать структуру из-за медленного охлаждения образцов большого сечения, отсутствия подобий схемы напряженно-деформированного состояния, условий внешнего трения и теплообмена с рабочим инструментом. Многие же лабораторные прокатные станы не обеспечивают достаточно высокую для моделирования скорость деформации (около 100 с^{-1}) образцов и не позволяют производить прокатку в несколько проходов с паузами между ними менее 3 с [29].

Основные закономерности формирования структуры металла в условиях непрерывной чистовой группы НШС и последующего охлаждения изучали с использованием метода физического моделирования [30].

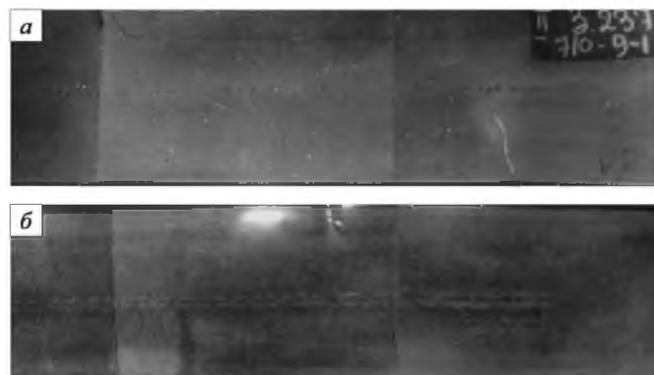


Рис. 2. Поперечные темплеты слябовых заготовок сечением $0,3 \times 1,85 \text{ м}$:

а – по опытной технологии; б – по действующей технологии

Fig. 2. Transverse templates of slab blanks with a section of $0,3 \times 1,85 \text{ м}$: а – using experimental technology; б – using current technology

Клиновидные образцы низкоуглеродистой стали Ст3сп промышленной плавки, отобранные от охлажденного на промежуточном рольганге стана 2000 НЛМК подката, прокатывали в один и два прохода на двухвалковом скоростном лабораторном стане с обводным устройством при температурах 880 – 1070 °С. При этом соблюдали геометрическое и кинематическое подобие процесса прокатки. Для исключения влияния температуры нагрева на размер зерна аустенита перед прокаткой все образцы подвергали аустенитизации в печи при температуре 1100 °С. Прокатанные образцы после фиксированных выдержек на воздухе сбрасывались специальным устройством на боковое ребро для частичной закалки в охлаждающем растворе. По длине образца получали набор относительных обжатий от 0 до 50 %, а по его ширине – набор скоростей охлаждения от 10 до 1000 °С/с.

В поперечных сечениях прокатанных образцов через каждые 10 % обжатия травлением у закаленного ребра выявлено бывшее зерно аустенита, а на остальной части – зерна феррита и перлита. Размер зерен измеряли методом отрезков (по 200 – 250 хорд на сечение). Из полученных гистограмм определяли среднюю величину хорды \bar{d} , вариацию распределения хорд v_d , их среднеквадратические отклонения $S_{\bar{d}}$ и S_{v_d} , доверительные интервалы $\pm \Delta \bar{d}$ для вероятности $P = 0,99$.

По результатам исследований для стали Ст3сп в координатах относительное обжатие ϵ – температура t – время τ были установлены области состояния структуры аустенита: *A* – инкубационного периода первичной рекристаллизации; *B* – первичной рекристаллизации; *C* – инкубационного периода собирательной рекристаллизации; *D* – собирательной рекристаллизации. Для области *B*, где протекает первичная рекристаллизация, характерна повышенная разноразмерность. В момент

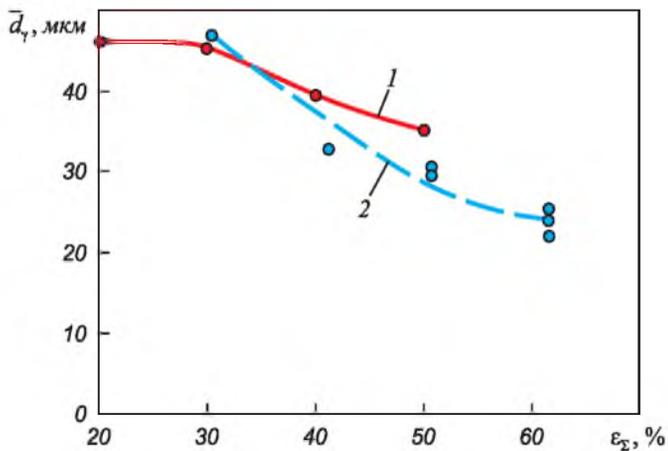


Рис. 3. Зависимость размера зерна аустенита стали Ст3сп от суммарного относительного обжатия ϵ_{Σ} :
1 – после одного прохода; 2 – после двух проходов

Fig. 3. Dependence of austenite grain size of St3sp steel on the total percent reduction ϵ_{Σ} :
1 – after one pass; 2 – after two passes

завершения первичной рекристаллизации получается мелкое зерно с минимальной разноразмерностью. При этом с увеличением относительного обжатия после одного и двух проходов наблюдается плавное уменьшение размера зерна аустенита (рис. 3). При прокатке в два прохода рекристаллизация между обжатиями протекала полностью.

Установленные закономерности структурообразования следует учитывать при разработке режимов горячей прокатки низкоуглеродистой стали [31]. Оптимизировать режим прокатки можно, используя критерий оптимизации процесса по структуре металла [32].

По результатам металлографических исследований для скоростей охлаждения в области фазовых превращений $W_{\gamma \rightarrow \alpha} = 2 \div 37$ °С/с при $\bar{d}_{\gamma} = 19,5 \div 34,5$ мкм была также установлена взаимосвязь зерна аустенита \bar{d}_{γ} с зерном феррита \bar{d}_{α} (рис. 4). При больших скоростях охлаждения (19 °С/с и более) размер получаемого зерна феррита не зависит от размера зерна аустенита, а определяется только скоростью охлаждения.

Зная средний размер зерна феррита низкоуглеродистой стали, можно с помощью уравнения Холла-Петча [33, 34] определить ее предел текучести:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k\bar{d}_{\alpha}^{-1/2},$$

где значение σ_0 регулируется твердорастворным упрочнением, дисперсионным твердением и количеством

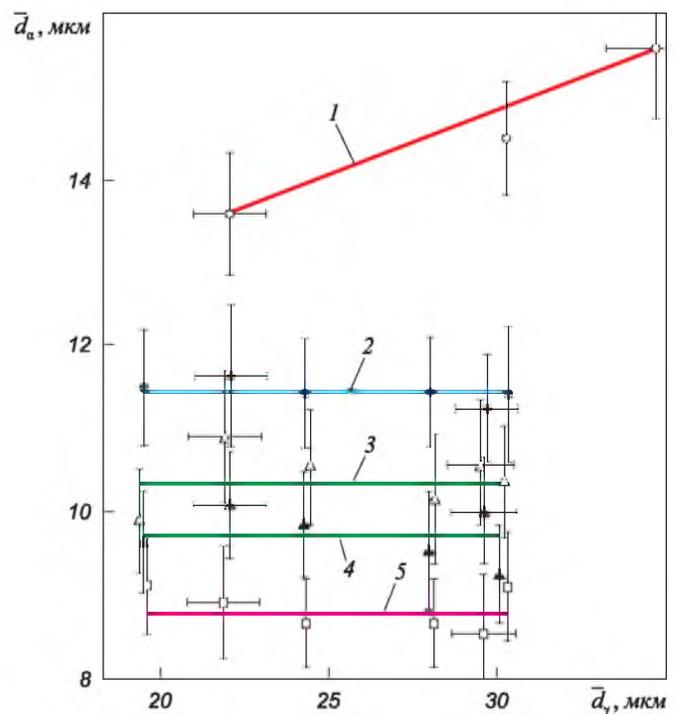


Рис. 4. Взаимосвязь зерна аустенита и феррита горячекатаной стали Ст3сп для скоростей охлаждения $W_{\gamma \rightarrow \alpha}$, °С/с:
1 – 2; 2 – 19; 3 – 26; 4 – 33; 5 – 37

Fig. 4. Interrelation of austenite grain and ferrite in St3sp hot-rolled steel for cooling rates $W_{\gamma \rightarrow \alpha}$ at °С/с:
1 – 2; 2 – 19; 3 – 26; 4 – 33; 5 – 37

перлита; \bar{d}_α – средний размер зерна феррита; k – константа.

Непосредственное использование горячих слябов для горячей прокатки полос при среднем годовом производстве 1 млн. т стали позволяет сэкономить более $350 \cdot 10^{12}$ Дж тепла.

При средней теплоте сгорания природного газа 35 МДж/м^3 [35] необходимый расход газа в год с учетом коэффициента полезного действия нагревательных устройств 92 % равняется $V = 10,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. С учетом средней цены 1 м^3 природного газа 4 руб/м^3 [Приказ № 217 – Э/2 Федеральной службы по тарифам РФ от 08.06.2015 г.] экономия за счет исключения дополнительного нагрева слябов под прокатку составит более 44 млн. руб/год.

Принимая во внимание цену производимого по ГОСТ 14637–89 горячекатаного листа из стали СтЗсп 4-ой категории качества 36 000 руб/т, перевод 100 тыс. т проката в год в более высокую 5-ю категорию качества (с увеличением цены на 5 %) даст экономический эффект более 180 млн. руб/год. Общий экономический эффект превысит 220 млн. руб/год.

Выводы. Новая технология разлива стали в кристаллизатор и конструкция погружного стакана позволяют при разливе слябов низкоуглеродистой стали увеличить до 50 % скорость кристаллизации стали в приповерхностном слое заготовки. Это способствует измельчению кристаллической структуры металла за счет уменьшения более чем в 1,5 раза ширины зоны столбчатых кристаллов и увеличения зоны разориентированных кристаллов. Заданная структура и механические свойства горячекатаного листа могут быть получены с использованием установленных закономерностей структурообразования при последующей горячей прокатке полос на непрерывном широкополосном стане. Экономический эффект при производстве горячекатаных листов низкоуглеродистой стали 1 млн. т/год составит более 220 млн. рублей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Протасов А.В., Пасечник Н.В., Сивак Б.А. Электрометаллургические мини-заводы. – М.: Metallurgizdat, 2013. – 420 с.
- Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос: Учеб. пособие / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.
- Ламухин А.М., Дубинин И.В. Пуск литейно-прокатного комплекса и освоение производства высококачественного проката для электросварных труб // *Металлург*. 2010. № 1. С. 38 – 44.
- Vedani M., Ripamonti D., Mannucci A., Dellasega D. Hot ductility of microalloyed steels // *La Metallurgia Italiana*. 2008. Is. 5. P. 19 – 24.
- Sun H., Su Y., Wu C. et al. The improvement of transverse crack on slab for plate products // *AISTech 2014 Proceedings*. 2014. P. 2923 – 2930.
- Tian L., Chen S. The surface quality of casting defect detection system // *AISTech 2014 Proceedings*. 2014. P. 1747 – 1757.
- Kim S.Y., Choi Y.S., Hwang J.Y., Lee S.H. Mold Heat Transfer Behavior at Hing Casting Speed Over 7 m/minute in the CEM, POSCO // *Iron Steel Technology*. 2016. Vol. 13. No. 7. P. 47 – 56.
- Raudensky M., Tseng A.A., Horsky J., Kominek J. Recent developments of water and mist spray cooling in continuous casting of steels // *Metallurgical Research Technology*. 2016. Vol. 113. No. 5. P. 509.
- Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo-peritectic steel in a continuous casting mold // *Tetsu-to-Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2014. Vol. 100. No. 4. P. 581 – 590.
- Kania H., Nowacki K., Lis T. Impact of the density of the mould powder on thickness of the layer of liquid slag in the continuous caster mould // *Metallurgija*. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 204 – 206.
- Jouji Kurisu, Arito Mizobe, Hiroki Furukawa, Takahiro Kuroda. The flow optimization design of the SEN for medium-thin slab CC Taikabutsu = *Refractories*. 2014. Vol. 66. No. 8. P. 385 – 391.
- Furumai K., Miki Y. Molten Steel Flow Control Technology for Decreasing Slab Defects // *JFE Giho*. 2016. No. 38. P. 36 – 41.
- Kratzsch Ch., Timmel K., Eckert S., Schwarze R. URANS Simulation of Continuous Casting Mold Flow: Assessment of Revised Turbulence Models // *Steel Research International*. 2015. Vol. 87. No. 4. P. 400 – 410.
- Sengupta J., Yavuz M. Metin. Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco's no. 1 continuous caster for minimizing sliver defects // *Iron and Steel Technology*. 2011. No. 7. P. 39 – 47.
- Lee P.B., Ramirez-Lopez P.E., Mills K.C. et al. Review: the "butterfly effect" in continuous casting // *Ironmaking and Steelmaking*. 2012. Vol. 39. No. 4. P. 244 – 253.
- Стулов В.В., Одинокоев В.И., Новикова Т.В., Чистяков И.В. О процессе кристаллизации слябовых заготовок // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2010. № 8. С. 15 – 17.
- Разработка нового способа разлива слябовых заготовок на МНЛЗ / В.В. Стулов, В.А. Магьсик, Т.В. Новикова и др. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВОРАН, 2008. – 158 с.
- Стулов В.В. Совершенствование процесса непрерывной разлива стали на основе исследования гидродинамики и теплообмена в кристаллизаторе. Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1992. – 17 с.
- Стулов В.В., Одинокоев В.И., Новикова Т.В., Староверов А.Д. Влияние деформации слябов и технологии их разлива на механические свойства получаемого проката // *Металлург*. 2010. № 1. С. 53 – 55.
- Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. – М.: МИСиС, 2005. – 430 с.
- Дубровский Б.А., Никифоров Б.А., Радионова Л.В. Исследование влияния технологических параметров горячей прокатки на структуру низкоуглеродистых и низколегированных марок стали // *Производство проката*. 2006. № 10. С. 13 – 16.
- Olasolo M., Uranga P., Rodriguez-Ibabe J.M., Lopez B. Effect of austenite deformation microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb-V microalloyed steel // *Materials Science and Engineering A*. 2011. No. 528. P. 2559 – 2569.
- Янковский А.В., Левченко Г.В., Воробей С.А., Карнаух А.И., Клименко А.П. Влияние температурно-деформационных параметров прокатки тонколистовой низкоуглеродистой стали на кинетику распада аустенита // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2004. № 8. С. 269 – 274.
- Li Y., Growther D.N., Mitchell P.S., Baker T.N. The evolution of microstructure during thin slab direct rolling processing in vanadium microalloyed steels // *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. P. 636 – 644.
- Hulka K., Gray J.M., Heisterkamp F. High temperature thermo-mechanical processing of pipe-line steels: Proc. Of the Intern. Symp. Niobium 2001 (Orlando, Florida, USA. December 2 – 5, 2001).
- Bo Xu Yun, Mei Yu Yong, Liang Xiao Bao, Yu Liu Zhen, Dong Wang Guo. Modelling of microstructure evolution during hot rolling of a high-Nb HSLA steel // *Journal of Materials Science*. 2010. Vol. 45. No. 10. P. 2580 – 2590.

27. Рудкой А.И., Колбасников Н.Г., Зотов О.Г. и др. Исследование структуры и свойств TRIP-сталей на комплексе Gleeble-3800 // Черные металлы. 2010. № 2. С. 8 – 14.
28. Futch D.B., Speer J.G., Findley K.O., Thomas G.A. Thermomechanical simulation of hot rolled Q&P sheet steels // Iron and Steel Technology. 2012. No. 12. P. 101 – 106.
29. Моделирование термомеханической прокатки – путь к снижению затрат при создании новой продукции // Металлург. 2010. № 1. С. 3.
30. Алдунин А.В., Русаков А.Д., Трайно А.И. Исследование и разработка технологий производства стальных полос. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 170 с.
31. Алдунин А.В. Разработка режимов горячей прокатки низкоуглеродистой стали с использованием закономерностей структурообразования // Производство проката. 2007. № 11. С. 7, 8.
32. Алдунин А.В. Основные принципы оптимизации процессов горячей прокатки полос по структуре и пластичности металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 5. С. 23 – 26.
33. Hall E.O. The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results // The Proceedings of the Physical Society. 1951. Vol. 64. Part 9. No. 381 B. P. 747 – 753.
34. Petch N.J. The Cleavage Strength of Polycrystals // Journal of the Iron and Steel Institute. 1953. Vol. 174. Part 1. P. 25 – 28.
35. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.

Поступила 20 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 10, PP. 798–803.

PRODUCTION TECHNOLOGY OF HOT ROLLED PLATE OF SPECIFIED QUALITY USING NEW TECHNICS OF LARGE SECTION SLABS CASTING

V.V. Stulov, A.V. Aldunin

Bauman Moscow State Technical University (Bauman MSTU), Russia, Moscow

Abstract. Development of new methods for production of continuous cast slab blanks shall not be based on low speed equilibrium crystallization processes in steel. Feeding melt into crystallizer side-wall layers through feed rising construction of submerged nozzle with eccentric outlet holes allows a significant increase in steel crystallization rate during slab casting. The main results of large section slabs casting using new technology providing improvement of their quality are given. When casting steel through an experimental nozzle, considerable decrease in width of columnar crystals zone and increase of disoriented crystals zone are observed, as well as decrease in index of centerline segregation. When casting with a new technology, heat transfer in crystallizer increases by 10–12 %. In impact test, a number of qualitative characteristics of metal have been identified that are not captured in other types of tests. The main regularities in metal structure formation in continuous finishing mill group of continuous wide strip mill (CWSM) and subsequent cooling were studied using physical modeling method. Wedge-shaped samples of industrial melted low-carbon steel, withdrawn from semi-finished rolled stock cooled on CWSM intermediate rolling table, were rolled in one and two passes on two-high speed laboratory rolling mill with a bypass device. Geometric and kinematic resemblance of rolling process was observed. Rolled samples, after fixed exposures on air, were dropped by a special device onto the lateral edge for partial hardening in cooling solution. A set of relative reductions were received longwise the sample, a set of cooling rates – edgewise. Based on results of physical modeling, the main formation regularities of low-carbon steel structure during rolling and accelerated cooling of strips on continuous wide strip mill were established. Using these regularities and the Hall-Petch equation, it is possible to provide specified structure and flow limit of the finished hot-rolled plate. By eliminating of additional heating of slabs for rolling and improving quality of rolled products, a significant economic effect can be obtained.

Keywords: continuous casting, crystallization, slab, continuous wide strip mill, physical modeling, low-carbon steel, structure, heat transfer.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-798-803

REFERENCES

1. Protasov A.V., Pasechnik N.V., Sivak B.A. *Elektrometallurgicheskie mini-zavody* [Electrometallurgical mini plants]. Moscow: Metallurgizdat, 2013, 420 p. (In Russ.).
2. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteino-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stal'nykh polos: Ucheb. posobie* [Thin slab foundry and rolling aggregates for steel strips production: Manual]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2003, 506 p. (In Russ.).
3. Lamukhin A.M., Dubinin I.V. Startup of a casting-rolling complex and mastery of the production of high-quality rolled products for electric-welded pipe. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 1-2, pp. 19–27.
4. Vedani M., Ripamonti D., Mannucci A., Dellasega D. Hot ductility of microalloyed steels. *La Metallurgia Italiana*. 2008, Issue 5, pp. 19–24.
5. Sun H., Su Y., Wu C. etc. The improvement of transverse crack on slab for plate products. *AISTech 2014 Proceedings*. 2014, pp. 2923–2930.
6. Tian L., Chen S. The surface quality of casting defect detection system. *AISTech 2014 Proceedings*. 2014, pp. 1747–1757.
7. Kim S.Y., Choi Y.S., Hwang J.Y., Lee S.H. Mold heat transfer behavior at high casting speed over 7 m/minute in the CEM, POSCO. *Iron Steel Technology*. 2016, vol. 13, no. 7, pp. 47–56.
8. Raudensky M., Tseng A.A., Horsky J., Kominek J. Recent developments of water and mist spray cooling in continuous casting of steels. *Metallurgical Research Technology*. 2016, vol. 113, no. 5, pp. 509.
9. Hanao M., Kawamoto M., Yamanaka A. Influence of mold flux on initial solidification of hypo-peritectic steel in a continuous casting mold. *Tetsu-to-Hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2014, vol. 100, no. 4, pp. 581–590.
10. Kania H., Nowacki K., Lis T. Impact of the density of the mould powder on thickness of the layer of liquid slag in the continuous caster mould. *Metallurgija*. 2013, vol. 52, no. 2, pp. 204–206.
11. Jouji Kurisu, Arito Mizobe, Hiroki Furukawa, Takahiro Kuroda. The flow optimization design of the SEN for medium-thin slab CC. *Taikabutsu = Refractories*. 2014, vol. 66, no. 8, pp. 385–391.
12. Furumai K., Miki Y. Molten steel flow control technology for decreasing slab defects. *JFE Gihō*. 2016, no. 38, pp. 36–41.
13. Kratzsch Ch., Timmel K., Eckert S., Schwarze R. URANS simulation of continuous casting mold flow: assessment of revised turbulence models. *Steel Research International*. 2015, vol. 87, no. 4, pp. 400–410.
14. Sengupta J., Yavuz M. Metin. Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco's no. 1 continuous caster for minimizing sliver defects. *Iron and Steel Technology*. 2011, no. 7, pp. 39–47.
15. Lee P.B., Ramirez-Lopez P.E., Mills K.C. et al. Review: the “butterfly effect” in continuous casting. *Ironmaking and Steelmaking*. 2012, vol. 39, no. 4, pp. 244–253.

16. Stulov V.V., Odinkov V.I., Novikova T.V., Chistyakov I.V. On slab solidification process. *Izvestiya VUZov: Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 15–17. (In Russ.).
17. Stulov V.V., Matysik V.A., Novikova T.V. etc. *Razrabotka novogo sposoba razlivki slyabovykh zagotovok na MNLZ* [Development of a new way of casting of slab blanks in continuous casting machine]. Komsomolsk-on-Amur: IMiM DVORAN, 2008, 158 p. (In Russ.).
18. Stulov V.V. *Sovershenstvovanie protsessa nepreryvnoi razlivki stali na osnove issledovaniya gidrodinamiki i teploobmena v kristallizatore. Avtoref dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the process of continuous casting of steel on the basis of the study of hydrodynamics and heat transfer in the crystallizer. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Moscow: MISiS, 1992, 17 p. (In Russ.).
19. Stulov V.V., Odinkov V.I., Novikova T.V., Staroverov A.D. Effect of the deformation of slabs and the technology used to cast them on the mechanical properties of the resulting rolled products. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 1-2, pp. 40–44.
20. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. 3rd ed. Moscow: MISiS, 2005, 430 p. (In Russ.).
21. Dubrovskii B.A., Nikiforov B.A., Radionova L.V. Investigation of the influence of hot rolling process parameters on the structure of low-carbon and low-alloyed steel. *Proizvodstvo prokata*. 2006, no. 10, pp. 13–16. (In Russ.).
22. Olasolo M., Uranga P., Rodriguez-Ibabe J.M., Lopez B. Effect of austenite deformation microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb-V microalloyed steel. *Materials Science and Engineering A*. 2011, no. 528, pp. 2559–2569.
23. Yankovskii A.V., Levchenko G.V., Vorobei S.A., Karnaukh A.I., Klimenko A.P. Influence of temperature-deformation parameters of rolling of thin-sheet low-carbon steel on kinetics of austenite decomposition. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2004, no. 8, pp. 269–274. (In Russ.).
24. Li Y., Growth D.N., Mitchell P.S., Baker T.N. The evolution of microstructure during thin slab direct rolling processing in vanadium microalloyed steels. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, pp. 636–644.
25. Hulka K., Gray J.M., Heisterkamp F. High temperature thermomechanical processing of pipe-line steels. In: *Proc. Of the Intern. Symp. Niobium 2001 (Orlando, Florida, USA. December 2-5, 2001)*.
26. Bo Xu Yun, Mei Yu Yong, Liang Xiao Bao, Yu Liu Zhen, Dong Wang Guo. Modelling of microstructure evolution during hot rolling of high-Nb HSLA steel. *Journal of Materials Science*. 2010, vol. 45, no. 10, pp. 2580–2590.
27. Rudskoi A.I., Kolbasnikov N.G., Zotov O.G. etc. Investigation of the structure and properties of TRIP-steels on the Gleeble-3800 complex. *Chernye metally*. 2010, no. 2, pp. 8–14. (In Russ.).
28. Futch D.B., Speer J.G., Findley K.O., Thomas G.A. Thermomechanical simulation of hot rolled Q&P sheet steels. *Iron and Steel Technology*. 2012, no. 12, pp. 101–106.
29. Modeling of thermomechanical rolling – a way to reduce cost of new production. *Metallurg*. 2010, no. 1, pp. 3. (In Russ.).
30. Aldunin A.V., Rusakov A.D., Traino A.I. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii proizvodstva stal'nykh polos* [Research and development of steel strip production technologies]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 170 p.
31. Aldunin A.V. Development of hot rolling modes for low-carbon steel using the patterns of structure formation. *Proizvodstvo prokata*. 2007, no. 11, pp. 7, 8. (In Russ.).
32. Aldunin A.V. Basic optimizing principles of processes of strips hot rolling by structure and plasticity of metal. *Izvestiya VUZov: Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 5, pp. 23–26. (In Russ.).
33. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of Results. *The Proceedings of the Physical Society*. 1951, vol. 64, part 9, no. 381 B, pp. 747–753.
34. Petch N.J. The cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1953, vol. 174, part 1, pp. 25–28.
35. Ametistov E.V., Grigor'ev V.A., Emtsev B.T. etc. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment: Spravochnik* [Heat and mass transfer. Thermotechnical experiment: Handbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 512 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.V. Stulov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technologies and Equipment of Rolling” (stuvv@inbox.ru)

A.V. Aldunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technologies and Equipment of Rolling”

Received April 20, 2017

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Башенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 25.10.2017. Формат 60×90 1/8. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ 6061. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATION OF BENDING MOMENTS OF STEEL SHEET AND REACTIONS OF WORKING ROLLERS IN MULTIROLL STRAIGHTENING MACHINE

MODERN WELDING METHODS OF THE RAILS OF NEW GENERATION

ENVIRONMENTALLY SAFE STORAGE OF WASTES FROM IRON-ORE ENRICHMENT

PRODUCTION TECHNOLOGY OF HOT ROLLED PLATE OF SPECIFIED QUALITY USING NEW TECHNIQS OF LARGE SECTION SLABS CASTING

DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASIS OF DETERMINING ENERGY-POWER PARAMETERS OF ROLLING WITH DEVELOPMENT OF NEW GRADES OF RAIL STEEL

THERMODYNAMIC JUSTIFICATION OF OPPORTUNITY OF USING HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION FLANKS FOR OXIDATION OF MELT IMPURITIES IN AGGREGATES OF CONVERTER TYPE. REPORT 2. INTERACTION OF THE FLANK WITH METAL AND SLAG IN THE CONVERTER BATH

STUDY OF THE VISCOSITY OF SLAGS OF $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-25\% \text{Al}_2\text{O}_3-8\% \text{MgO}$ SYSTEM

CHANGES IN STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE SURFACE OF DIFFERENTIALLY HARDENED 100-METER RAILS IN OPERATION

INVESTIGATION OF LÜDERS DEFORMATION IN THE MILD STEEL

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE OF HIGH-CHROMIUM STEELS MODIFIED WITH AN INTENSE PULSED ELECTRON BEAM

INFLUENCE OF FRICTION COEFFICIENT BETWEEN THE CRUSHED MATERIAL AND THE CHEEK IN ONE-ROLL CRUSHER ON CRUSHING PROCESS ENERGY CAPACITY

TO THE 60TH ANNIVERSARY OF EUGENII VALENTINOVITCH PROTOPOPOV

TO THE 70TH ANNIVERSARY OF VIKTOR EVGEN'EVITCH GROMOV