Зарегистрирован
в Госкоминформ политики,
телевидения и радиовещания Украины
КВ № 6985 от 18 февраля 2003 года
Издается с июня 1993 года

Рекомендован к печати Ученым советом
Физико-технологического института
металлов и сплавов НАН Украины

Журнал входит в Перечень научных
профессиональных изданий Украины,
рекомендованных для публикации трудов
соискателей кандидатских и докторских степеней

№3-4'2019
(310-311)

Металл и литье Украины

наука техника технология бизнес

Учредитель: **Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины**

Издатели: **Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины**

Донецкий национальный технический университет

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины

Ассоциация литейщиков Украины

Украинская ассоциация сталеплавильщиков

ПРОЦЕССЫ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Верзилов А.П.
Физическое моделирование асимметричного истечения металла в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок. 5

Писарский С.Н., Смирнов А.Н.
Исследование современных представлений о природе формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Сообщение 2. 10

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Пономаренко О.И., Косенко О.П., Швец М.В., Евтушенко С.Д.
Применение компьютерно-интегрированного проектирования для нетехнологичных отливок шахтного оборудования. 18

Гнатуш В.А., Дорошенко В.С.
Рост производства алюминиевого литья в начале XXI века. 25

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЛИТЬЯ

Лукьяненко И.В.
Исследование технологических параметров процесса получения чугунных отливок для работы в условиях износа. 34

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Василев Я.Д., Замогильный Р.А.
Влияние особенностей контактного взаимодействия тонкой полосы с валками на параметры начальной настройки рабочей клети и наименьшую толщину прокатываемой полосы. 41

Бабаченко А.И., Кононенко А.А., Подольский Р.В., Дементьева Ж.А., Шпак Е.А., Клиновая О.Ф.
Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства. 48

Мищенко А.В.
Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана 58

в номере

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев-2019

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сергеев С.Н.
Новый высокоэффективный энергосберегающий комплекс газоочистного оборудования для проведения регулируемой очистки выбросов от машин и агрегатов металлургических производств. Сообщение 2. 69

Крыжановский К.С., Самарай В.П.
Преемственность поколений. 76

Поздравляем!
75 лет Наривскому Анатолию Васильевичу 79

Поздравляем!
80 лет Дубоделову Виктору Ивановичу 80

Конференции в 2019 году. 81

редакционная коллегия

Смирнов А.Н. главный редактор, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Дубоделов В.И. зам. главного редактора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины, зав. отделом, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Верзилов А.П. ответственный секретарь, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Бабаченко А.И. д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина

Величко А.Г. д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Гнилоскуренко С.В. канд. техн. наук, зав. отделом, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Гридин А.Ю. д-р техн. наук, доц., зам. зав. кафедрой, Падерборнский университет, Падерборн, Германия

Кавалек А.А. проф., Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша

Клименко С.И. канд. техн. наук, директор Департамента литейного производства, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Кондратюк С.Е. д-р техн. наук, проф., зав. отделом, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Ладохин С.В. д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Лихошва В.П. д-р техн. наук, проф., зав. отделом, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Лобанов Л.М. д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

Мазур В.Л. д-р техн. наук, проф., чл.-корр. НАН Украины, гл. науч. сотр., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Найдек В.Л. д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины, советник при дирекции, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Ноговицын А.В. д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зам. директора по научно-технической работе, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Нурадинов А.С. д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр., Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Петренко В.А. д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки и техники Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Пономаренко О.И. д-р техн. наук, проф., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

Приходько И.Ю. д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина

Сигарев Е.Н. д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, Днепровский государственный технический университет, Каменское, Украина

Чернятевич А.Г. д-р техн. наук, проф., зав. отделом, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украин

Шинский О.И. д-р техн. наук, проф., зав. отделом, президент Ассоциации литейщиков Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

ISSN 2077-1304
© Металл и литье Украины, 2019

редакция



Редактор
Анастасия Андреевна Горшкова

Корректор
Надежда Александровна Верховлюк





Макет
Сергей Анатольевич Цихмайстренко
Лилия Викторовна Школяренко

Верстка
Ольга Викторовна Козачко

адрес редакции и типографии

Украина, 03142, г. Киев, бул. Акад. Вернадского, 34/1
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
Телефон: (044) 424-04-10, 424-34-50, факс (044) 424-35-15
E-mail: mlu@ptima.kiev.ua
Информация о журнале на сайте: www.steelcast.com.ua

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением автора. Ответственность за достоверность представленных материалов несут авторы статей.
За рекламную информацию отвечают рекламодатели.

Сдано в набор 20.05.2019. Подписано в печать 22.07.2019. Формат 60х84/8. Бумага офсетная № 1. Печать на ризографе.
Уч.-изд. л. – 11,82. Усл.-печ. л. – 10,23. Усл. кр.-от. – 11,15. Тираж – 150. Отпечатано ООО «Про формат», ул. Маршала Жукова, 45 Б.

ISSN 2077-1304
© Металл и литье Украины, 2019

УДК 669.01.53:621.74.047

А.П. Верзилов, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: verzilovalex@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Физическое моделирование асимметричного истечения металла в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок

Эксплуатационный ресурс погружного стакана может быть снижен вследствие зарастания или размывания его полости, а также эрозионного износа в зоне шлакового пояса. При этом зарастание погружного стакана является серьезной проблемой, так как носит непрерывный характер и оказывает существенное влияние на гидродинамическую картину истечения металла внутри кристаллизатора слябовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), делая ее асимметричной. Это обстоятельство в свою очередь сказывается на качестве получаемой непрерывнолитой заготовки.

В процессе непрерывной разливки полость погружного стакана постепенно зарастает, и характер истечения потоков изменяется, что приводит к нарушению технологического процесса и может вызывать волнообразование на мениске металла, а также подмывание корочки затвердевающего металла на узких стенках кристаллизатора. Визуальное подтверждение серьезного нарушения картины распределения потоков в кристаллизаторе возможно уже на самом последнем этапе разливки непосредственно перед заменой погружного стакана.

Исходя из этого, в статье представлены исследования, направленные на изучение процессов истечения металла в кристаллизаторе в середине или конце разливки при использовании погружного стакана, в полости которого наблюдаются отложения включений.

В статье представлены результаты физического моделирования процессов поведения жидкой стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ при зарастании полости погружного стакана включениями для нескольких наиболее характерных ситуаций. Исследован процесс образования воронкообразных вихрей в кристаллизаторе, а также выявлены основные негативные последствия этого явления. Возникновение воронкообразных вихрей следует связывать с развитием процессов зарастания, а именно асимметричным характером движения металла в кристаллизаторе. Вследствие этого вглубь жидкой ванны вовлекаются частички шлакообразующей смеси и остаточные включения.

Ключевые слова: *машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), кристаллизатор, погружной стакан, зарастание, асимметричное истечение, сляб.*

В процессе непрерывной разливки стали внутренняя полость погружного стакана и выпускных отверстий может претерпевать значительные изменения в связи с развитием процессов размывания или зарастания как традиционным путем [1–3, 8], так и вследствие отложения металлических частиц, вызванных разбрызгиванием металла [4]. При этом характер истечения стали в кристаллизаторе также в значительной степени меняется в каждый конкретный момент процесса разливки. Такие изменения могут вызывать как незначительные отклонения от нормального течения потоков, так и приводить к серьезнейшим нарушениям технологического процесса. Так, в промышленных условиях при разливке стали зеркало металла в кристаллизаторе, как правило, практически неподвижно. Тем не менее, если возмущения поверхности видно визуально, то это свидетельствует о том, что течение технологического процесса существенно нарушено, и значит, погружной стакан зарос и нуждается в срочной замене [5]. Исходя из этого, очень важно понимать каким образом протекают процессы зарастания, а также какими явлениями они сопровождаются, чтобы сформировать представление о том, на каком этапе следует вывести погружной стакан из эксплуатации, чтобы избежать аварийных ситуаций.

В настоящей статье представлены результаты исследований по установлению гидродинамической картины в кристаллизаторе при физическом (водном) моделировании процессов частичного зарастания выпускных отверстий погружного стакана. Необходимость таких исследований объясняется тем, что деформация формы и уменьшение площади выпускных отверстий наибольшим образом оказывают влияние на характер истечения металла в кристаллизаторе (рис. 1) и качество поверхности сляба. При этом в процессе разливки характер распределения потоков в кристаллизаторе претерпевает значительные

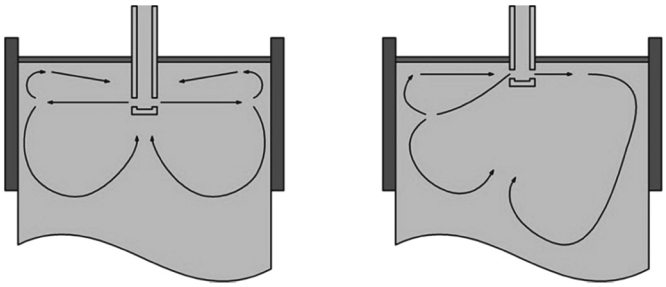


Рис. 1. Характер движения потоков металла в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ: *а* – в начальный момент использования погружного стакана; *б* – при зарастании погружного стакана в процессе разливки

изменения [1, 2, 5–6]. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе конструкции погружного стакана для условий конкретного металлургического производства [1].

Для развития существующих представлений и качественной оценки наблюдаемых явлений широкое распространение получило физическое моделирование, позволяющее, в том числе, визуализировать движение потоков в жидкой ванне кристаллизатора как в начальный момент времени, так и в процессе разливки.

Исследования были проведены с использованием методов физического моделирования. Масштаб физической модели участка промежуточный ковш – кристаллизатор МНЛЗ составил 1:2 к натурному объекту. В качестве основных критериев подобия выступили критерий Фруда и Вебера. В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре 18–25 °С [7]. Имитация покровного шлака на поверхности металла в кристаллизаторе осуществлялась с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое поверхностное натяжение.

Моделирование процессов зарастания погружного стакана, которое вызывает асимметричный подвод металла в кристаллизатор, производили для трех основных ситуаций, предваряющих замену погружного стакана:

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании верхней части выпускных отверстий (рис. 2);

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании нижней части выпускных отверстий (рис. 3);

– уменьшение площади левого бокового отверстия погружного стакана на 80 % в верхней части, правого – на 80 % в нижней (рис. 4).

Первый случай моделирует достаточно частую ситуацию, когда верхний циркуляционный поток, возвращаясь к зоне выпускных отверстий, способствует их дополнительному затягиванию сверху. Применительно к моделируемой ситуации, жидкостный поток в левой части кристаллизатора характеризуется большей интенсивностью, нежели в правой, что влечет за собой неравномерное затвердевание корочки стали на узких стенках. При этом в левой части сила взаимодействия с узкой стенкой очень высока, поэтому отраженный от боковой стенки верхний циркуляционный поток способствует развитию на поверхности волновых явлений. В правую верхнюю часть кристаллизатора жидкостный поток поступает по остаточному принципу, так как из правого выпускного отверстия он направляется на нижний горизонт кристаллизации.

Во втором случае было отмечено, что в результате зарастания нижней части боковых отверстий

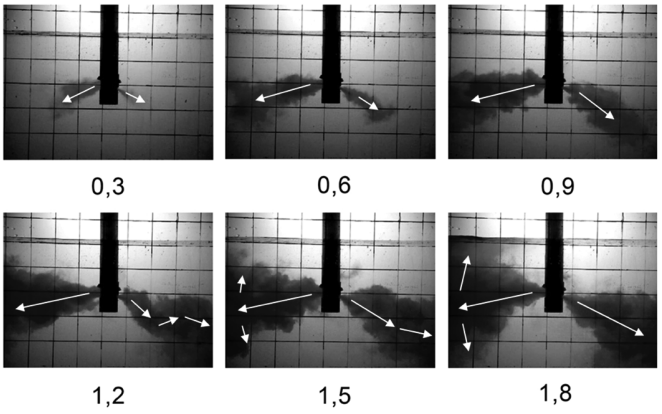


Рис. 2. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании верхней части выпускных отверстий, с

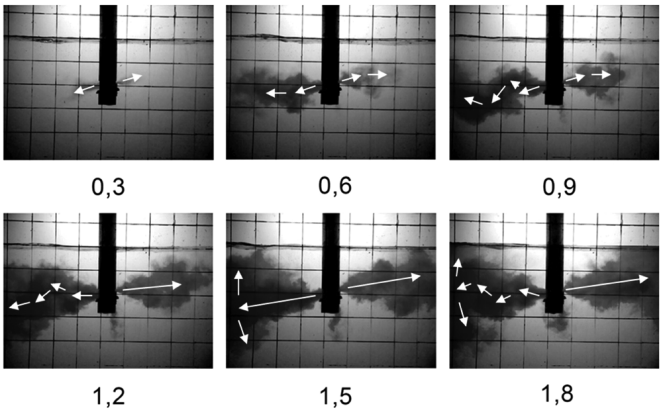


Рис. 3. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 20 %, правого – на 80 % при зарастании нижней части выпускных отверстий, с

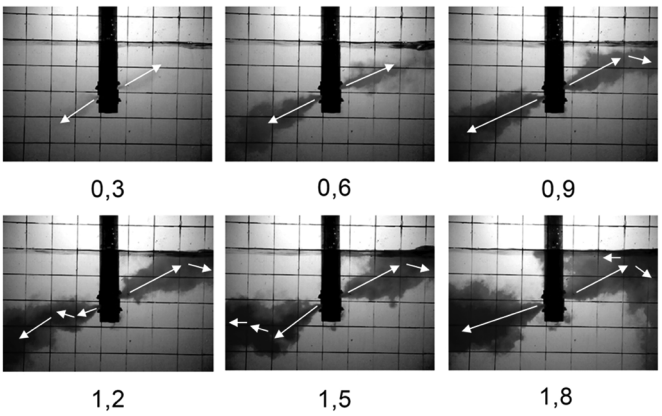


Рис. 4. Кинограмма распределения потоков в ванне кристаллизатора при уменьшении площади левого бокового отверстия погружного стакана на 80 % в верхней части, правого – на 80 % в нижней, с

погружного стакана, весь поток направляется в верхнюю часть кристаллизатора. При этом левая струя, истекающая из бокового отверстия погружного стакана, характеризовалась *S*-образным расконцентрированным характером течения. В левой верхней части кристаллизатора также создавались предпосылки для возмущения поверхности, и наблюдалось волнообразование.

В третьем случае, истечение из погружного стакана характеризуется наибольшими отклонениями от нормального течения технологического процесса. Как и в предыдущем варианте, наблюдается *S*-образный характер истечения струй. Также струя, истекающая из правого бокового отверстия, двигаясь в направлении верхнего угла кристаллизатора, создает в нем предпосылки к существенному развитию процессов волнообразования.

В ходе исследований асимметричного подвода стали в кристаллизатор МНЛЗ было также отмечено явление образования под зеркалом металла вихрей (рис. 5).

Установлено, что при развитии вихрей происходит затягивание шлакообразующей смеси вглубь жидкой ванны кристаллизатора, что может служить причиной дополнительного загрязнения стали шлаковыми включениями. Следовательно, на практике необходимо предупреждать образование вихревых явлений в кристаллизаторе.

Развитие вихрей следует связывать с нарушением рациональной гидродинамической картины движения потоков металла, когда в процессе литья в узкий промежуток времени формируются условия для их возникновения.

Как показали результаты физического моделирования, возникновение вихрей наблюдалось даже при перекрытии одного из выпускных отверстий более чем на 25 % от его исходного сечения. Так, при асимметричном течении рабочей жидкости в кристаллизаторе вихрь формировался уже через некоторое время после начала истечения в зоне с заросшим выпускным отверстием. Схематическое представление воронкообразования приведено на рис. 6.

Развитие интенсивного вихря, пронизывающего весь столб жидкости в кристаллизаторе, не происходило, вследствие захвата «хвоста» струей, вытекающей из выпускного отверстия. Следует обратить внимание, что от момента образования вихря до его затухания не представлялось возможным визуально зафиксировать данный процесс на поверхности масла в кристаллизаторе.

В результате исследований показано, что в процессе зарастания погружного стакана гидродинамическая картина распределения потоков может измениться кардинальным образом. При этом на последней стадии процесса зарастания такое изменение всегда будет сопровождаться колебаниями поверхности жидкости в зоне мениска. Однако визуальное подтверждение этого обстоятельства влечет за собой необходимость замены погружного стакана. Тем не менее, качество получаемой стали будет достаточно низким вследствие развития всех явлений,

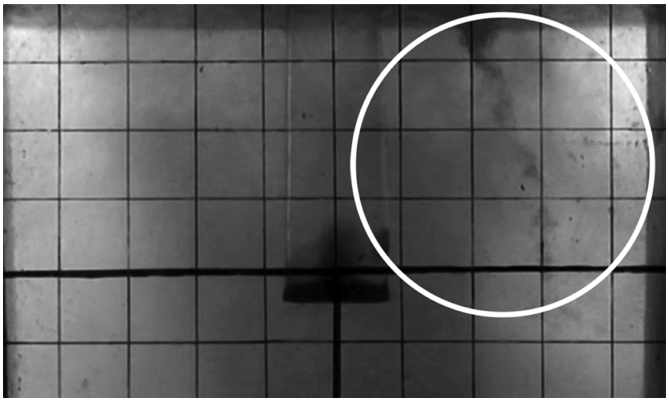


Рис. 5. Явление вихря при асимметричном характере истечения моделирующей жидкости из погружного стакана

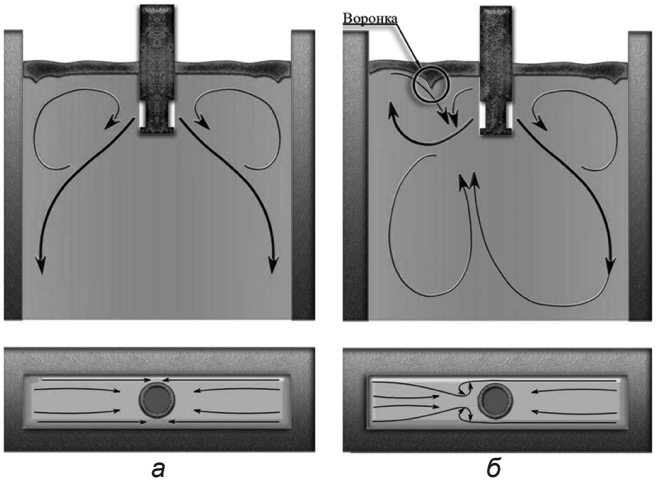
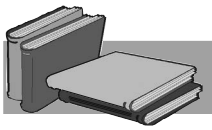


Рис. 6. Схематическое представление движения потоков в кристаллизаторе: *а* – симметричное истечение; *б* – асимметричное истечение (образование воронкообразного вихря)

предшествующих выводу из эксплуатации погружного стакана.

В частности, одним из важных явлений, которое визуализировать в процессе разливки не представляется возможным, является развитие вихрей под поверхностью металла в кристаллизаторе. Их возникновение следует связывать с развитием процессов зарастания, а именно асимметричным характером движения металла в кристаллизаторе. Вследствие этого вглубь жидкой ванны вовлекаются частички шлакообразующей смеси и остаточные неметаллические включения.

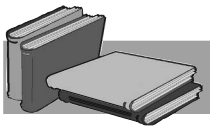
Совокупность всех приведенных выше обстоятельств позволяет говорить о серьезной проблеме, которая может быть решена только путем создания погружного стакана, который должен учитывать не только условно идеальные условия разливки, но и содействовать минимизации проявлений процессов зарастания в части движения потоков.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов А.Н., Верзилов А.П.* Погружные стаканы для непрерывной разливки слябов на МНЛЗ. *ОАО «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия.* 2011. № 9. С. 42–51.
2. *Rakeps K.G., Thomas B.G.* Clogging in Continuous Casting Nozzles. *78th Steelmaking Conf. Proc., Warrendale, PA,* 1995. Vol. 78. P. 723–734.
3. *Аксельрод Л.М.* Повышение стойкости графитсодержащих погружных стаканов для МНЛЗ. *Огнеупоры.* 1996. № 6. С. 27–30.
4. *Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Ухин В.Е., Верзилов А.П. И*сследование отложений, образующихся внутри погружного стакана при разливке на слябовой МНЛЗ. *Сб. научн. трудов «Современные огнеупоры и технологии в производстве стали». По материалам XIX международной научно-технической конференции «Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях».* Донецк: Ноулидж, 2013. С. 92–98.
5. *Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В.* Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
6. *Thomas B.G., Yuan Q., Zhang L., Vanka S.P.* Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel. *NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc.* / R.G. Reddy (ed.). 2003. P. 2328–2362.
7. *Mazumdar D., Guthrie R.I.* The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International.* 1999. Vol. 39. № 3. P. 525–548.
8. *Аксельрод Л.М., Паршин В.М., Мазуров Е.Ф.* Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали. *Сталь.* 2007. № 4. С. 30–33.

Поступила 08.05.2019



REFERENCES

1. *Smirnov, A.N., Verzilov, A.P.* (2011). SEN for continuous casting of slabs on CCM. *Chermetinformatsiya OJSC. Bul. Ferrous metallurgy,* no. 9, pp. 42–51 [in Russian].
2. *Rakeps, K.G., Thomas, B.G.* (1995). Clogging in Continuous Casting Nozzles. *78th Steelmaking Conf. Proc*., *Warrendale, PA*. Vol. 78, pp. 723–734 [in English].
3. *Axelrod, L.M.* (1996). Increase of durability of graphite-containing SEN for CCM. *Refractories,* no. 6, pp. 27–30 [in Russian].
4. *Smirnov, A.N., Efimova, V.G., Ukhin, V.E., Verzilov, A.P.* (2013). Investigation of sediments formed inside the SEN during casting on a slab CCM. *Com. scientific works "Modern refractories and technology in the production of steel." According to the materials of the XIX International Scientific-Technical Conference "Modern refractories: resource saving and application in metallurgical technologies".* Donetsk: Noulidzh, pp. 92–98 [in Russian].
5. *Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Shtepan, E.V.* (2011). Continuous casting of steel. Donetsk: DonNTU, 482 p. [in Russian].
6. *Thomas, B.G., Yuan, Q., Zhang, L., Vanka, S.P.* (2003). Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel. *NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc.*, R.G. Reddy, ed., pp. 2328–2362 [in English].
7. *Mazumdar, D., Guthrie, R.I.* (1999). The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems. *ISIJ International.* Vol. 39, no. 3, pp. 525–548 [in English].
8. *Axelrod, L.M., Parshin, V.M., Mazurov, E.F.* (2007). The process of clogging SEN with continuous casting of steel. *Steel,* no. 4, pp. 30–33 [in Russian].

Received 08.05.2019

О.П. Верзілов, канд. техн. наук, наук. співр.,
e-mail: verzilovalex@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

Фізичне моделювання асиметричного витікання металу у кристалізатор слябової машини безперервного лиття заготовок

Анотація

Експлуатаційний ресурс зануреного стакана може бути знижений внаслідок заростання або розмивання його порожнини, а також ерозійного зносу в зоні шлакового пояса. При цьому заростання зануреного стакана є серйозною проблемою, оскільки носить безперервний характер і має суттєвий вплив на гідродинамічну картину витікання металу всередині кристалізатора слябової машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), роблячи її асиметричною. Ця обставина в свою чергу позначається на якості отримуваної безперервнолитої заготовки.

У процесі безперервного розливання порожнина зануреного стакана поступово заростає, і характер витікання потоків змінюється, що призводить до порушення технологічного процесу і може викликати хвилеутворення на меніску металу, а також підмивання кірочки металу, що твердіє на вузьких стінках кристалізатора. Візуальне підтвердження серйозного порушення картини розподілу потоків в кристалізаторі можливо вже на останньому етапі розливання безпосередньо перед заміною зануреного стакана.

Виходячи з цього, в статті представлено дослідження, спрямовані на вивчення процесів витікання металу в кристалізаторі в середині або кінці розливання при використанні зануреного стакана, в порожнині якого спостерігаються відкладення включень.

У статті представлено результати фізичного моделювання процесів поведінки рідкої сталі в кристалізаторі слябової МБЛЗ при заростанні порожнини зануреного стакана включеннями для декількох найбільш характерних ситуацій. Досліджено процес утворення воронкоподібних вихорів в кристалізаторі, а також виявлено основні негативні наслідки цього явища. Виникнення воронкоподібних вихорів слід пов'язувати з розвитком процесів заростання, а саме асиметричним характером руху металу в кристалізаторі. Внаслідок цього вглиб рідкої ванни залучаються частинки шлакоутворюючої суміші і залишкові включення.

Ключові слова

Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), кристалізатор, занурений стакан, заростання, асиметричне витікання, сляб.

A.P. Verzilov, Candidate of Engineering Sciences, Researcher, e-mail: verzilovalex@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0463-5006

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Physical modeling of the asymmetric flow of the metal in the mold slab of continuous casting machine

Summary

The service life of the submerged entry nozzle (SEN) can be reduced due to clogging or erosion of its cavity, as well as erosion wear in the zone of the slag belt. At the same time, clogging of the SEN is a serious problem, since it is of a continuous nature and has a significant impact on the hydrodynamic pattern of metal outflow inside the mold of the slab continuous casting machine (CCM), making it asymmetric. This circumstance, in turn, affects the quality of the continuous cast billet.

In the process of continuous casting, the cavity of the SEN gradually grows and the nature of the outflow of flows changes, which leads to disruption of the technological process and can cause wave formation on the meniscus of the metal, as well as washing away the crust of the metal on the narrow walls of the mold. Visual confirmation of a serious violation of the pattern of flow distribution in the mold is possible already at the very last stage of the casting immediately before replacing SEN.

Based on this, the article presents studies aimed at studying the processes of metal outflow in the mold in the middle or end of casting using an SEN, in the cavity of which inclusions deposits are observed.

The article presents the results of physical modeling of the behavior of liquid steel in mold of slab CCM when the cavity of an SEN is clogging with inclusions for several of the most characteristic situations. The process of formation of funnel vortices in the mold was investigated, and the main negative consequences of this phenomenon were revealed. The occurrence of funnel vortices should be associated with the development of clogging processes, namely, the asymmetric nature of the movement of the metal in the mold. As a result, particles of mold powder mixture and residual inclusions are involved in the depth of the liquid bath.

Keywords

Continuous casting machine (CCM), mold, submerged entry nozzle (SEN), clogging, asymmetric flow, slab.

УДК 669.74.047

С.Н. Писарский[1], инженер машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), e-mail: serge.pisarsky@gmail.com
А.Н. Смирнов[2], д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: stalevoz@i.ua

[1]Standart Metallurgical Company, Лагос, Нигерия
[2]Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Исследование современных представлений о природе формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Сообщение 2

В Сообщении 2 (Сообщение 1, «Металл и литье Украины» № 1–2, 2019) продолжены аналитические исследования по важным и мало изученным аспектам формирования отложений в огнеупорах разливочных систем. Поскольку отложения состоят, в основном, из коралло-подобных кластеров, дендритных и близких к ним пластинчатых структур, а также, учитывая многообразие и в ряде случаев противоречивость представлений по механизмам их формирования, в статье проанализированы факторы и закономерности формирования этих морфологических типов. Показано, что при формировании кристаллических структур пластинчатого типа важную роль играет явление ингибирования отдельных граней кристаллов поверхностно-активными в железе примесями. Принимая во внимание результаты промышленных исследований и численного моделирования процессов нуклеации и роста включений Al_2O_3 при раскислении стали, в Сообщении 2 обоснован вывод о том, что дендритные и пластинчатые структуры в отложениях не могут быть результатом осаждения ни продуктов раскисления, ни вторичного окисления стали. Они могут формироваться непосредственно на межфазной поверхности «огнеупор (отложения) – расплав» в огнеупорах разливочных систем по механизму кристаллизационного роста.
В отношении коралло-подобных кластеров с учетом имеющихся критических замечаний к известному «кавитационному» механизму кластеризации кристаллических Al_2O_3-содержащих включений в стали, предложены качественно новые подходы для разработки новой модели кластеризации. В ее рамках получает удовлетворительные объяснения ряд характерных особенностей формирования и пространственной структуры таких кластеров (контакт включений анизометрической формы преимущественно по вершинам, ребрам, боковым кромкам многогранников и пластинчатых включений; низкая склонность к коагуляции сферических включений; высокая прочность кластеров, препятствующая их разрушению в турбулентных потоках и др.). Показано, что процесс кластеризации является составной частью формирования отложений.
Результаты выполненных исследований позволили уточнить контуры предлагаемой к разработке новой физико-химической модели явления формирования отложений в огнеупорах при разливке стали.

Ключевые слова: *разливка стали, формирование отложений, включения, дендриты, пластинчатые включения, ингибирование, кластеризация, адсорбционно-сольватный фактор, анизометрия, кристаллизационный рост, переконденсация.*

В Сообщении 1 была обоснована необходимость разработки новой физико-химической модели формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Для определения ее контуров необходимо уточнить представления по ряду вопросов, связанных с формированием включений различных морфологических типов. Это обусловлено тем обстоятельством, что, как отмечалось в Сообщении 1, коралло-подобные кластеры, наряду с дендритными и пластинчатыми структурами, составляют основу отложений, но при этом они отличаются от одноименных морфологических типов включений, присутствующих в стали. Кроме того, нередко существующие представления по механизмам формирования различных морфологических типов включений в стали и в отложениях являются, на наш взгляд, некорректными. Например, некоторые исследователи полагают, что: 1) морфология включений в составе отложений зависит от чистоты стали по включениям и условий разливки; 2) изменение морфологии включений в составе отложений происходит в процессе их спекания с поверхностью огнеупора (массива отложений) [1, 2]. Другие полагают, что формирование дендритных включений происходит по механизму коагуляции (агрегации) индивидуальных включений [3]. В отношении кластеров, в том числе коралло-подобных, предполагается, что они могут формироваться в результате трансформации по механизму Оствальдовского созревания как скоплений (агрегатов) из отдельных включений, так и дендритов [4, 5, 6]. Отмечается также, что механизм кластеризации включений Al_2O_3 в стали изучен недостаточно [5]. Таким образом, уточнение основных физико-химических закономерностей формирования различных морфологических типов кристаллических включений в стали и отложениях представляется, на наш взгляд, необходимым этапом на пути к разработке новой модели формирования отложений.

Морфология кристаллов, согласно современным физическим представлениям [7], зависит от: 1) их кристаллографической структуры, определяемой химическим составом; 2) условий роста (эволюции)

и 3) наличия примесей в маточном растворе. Кристаллы при росте приобретают ту или иную форму в результате взаимодействия между процессами тепло- и массопереноса, а также кинетическими явлениями на поверхности раздела фаз. Условия роста определяются величиной химического пересыщения и соотношением реагентов, интенсивностью и направленностью массообменных процессов в зоне реакции. При определенных условиях (значительные градиенты пересыщения и температуры, наличие вектора диффузии, присутствие примесей, анизотропная форма кристалла, вязкость маточной фазы и др.) равновесная форма кристалла теряет смысл, и возникают его неравновесные формы, в частности дендритные. Значительное пересыщение в этих условиях обеспечивается у вершин и ребер кристалла и меньше – по центру граней. Зарождение на вершинах и ребрах новых слоев роста опережает их разрастание по граням, отчего возникают незаросшие промежутки в теле кристалла. При их опережающем росте происходит также оттеснение примесей от вершин и ребер на грани кристалла, что также тормозит рост последних.

Применительно к морфологии включений в стали многие из указанных показателей зависят от технологических и других факторов ее производства, например, от вида и количества используемых раскислителей, последовательности их ввода, активности кислорода в стали на выпуске, интесивности продувки металла и длительности выдержки плавки в ковше и др. [3, 6, 8].

Экспериментально подтверждено, что продукты раскисления стали алюминием могут иметь дендритную морфологию при одновременном соблюдении 3-х условий [9, с. 60]:

– высокой степени химического пересыщения металла реагентами;

– наличия определенного соотношения их концентраций;

– существования вектора диффузии реагентов.

Для сравнения отметим, что формирование идиоморфных включений требует пониженного содержания растворенного кислорода в стали при высокой степени химического пересыщения компонентов реакции и равномерном по всем направлениям подводе их к растущему кристаллу.

Для дендритных форм роста характерно происходящее по определенным законам расщепление ребер или вершин скелетного кристалла, что может быть обусловлено наличием различного рода примесей и дефектов на поверхности граней [7]. Изначальная кристаллографическая закономерность роста кристалла при дендритном росте утрачивается. Следствием этого является формирование кристаллографически разупорядоченных субиндивидов, образующих индивидуальный кристалл. Они ветвятся и разрастаются в направлении наиболее интенсивного массопереноса к их поверхности питающего материала. Дендриты, представляя энергетически неустойчивые системы с высокой поверхностной энергией, стабильны только в момент их формирования. При наличии соответствующих равновесных условий они способны дорастать или перекристаллизовываться до полногранных кристаллов.

Пластинчатые, так же как и дендритные включения, являются продуктами кристаллизационного роста. Можно предположить, что пластинчатые включения имеют сходную с дендритами природу образования, то есть являются разновидностью дендритной морфологии, а наблюдаемое между ними морфологическое отличие обусловлено различием в условиях формирования. В частности, доказано, что это связано с сильным ингибированием роста граней в одном из кристаллографических направлений поверхностно активными (ПА) примесями в железе (кислород, сера, азот и др.) [10, 11]. Интенсивность ингибирования той или иной грани кристаллического включения определяется величиной ее поверхностной энергии, зависящей от особенностей атомной структуры поверхности граней. Максимальная адсорбция ПА-примеси и, соответственно, минимальная скорость роста будет наблюдаться на гранях с минимальным поверхностным натяжением. Установлено также, что перемешивание расплава усиливает действие ПА-примесей и способствует образованию пластинчатых включений [11].

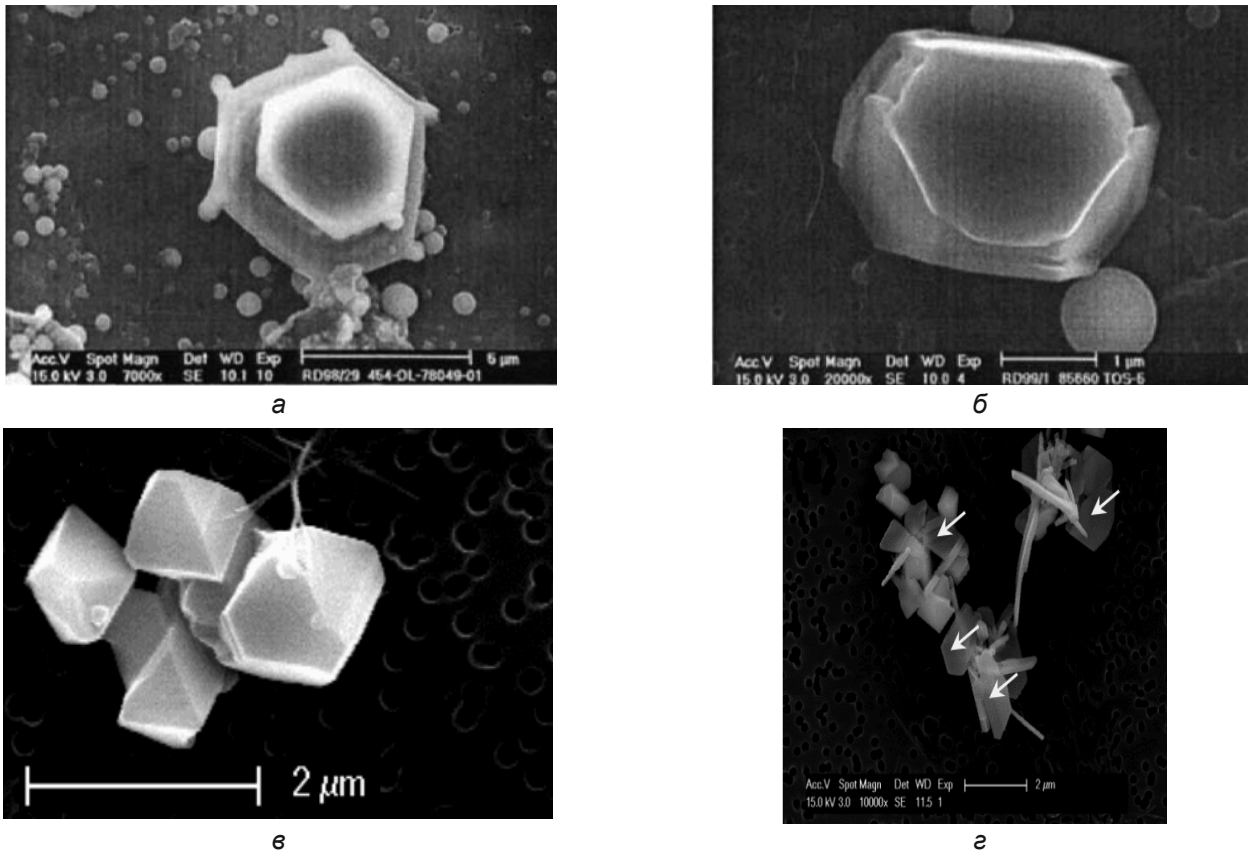
Кластеры из кристаллических включений в стали при определенных условиях, например, при нарушении режима продувки металла в ковше, могут приобретать макроскопические масштабы (до 3 мм), что заметно ухудшает ее качество и может, вероятно, являться причиной формирования отложений [4; 12; 13, с. 160]. Крупные кластеры могут попадать в непрерывнолитую сталь в результате их периодического отрыва от поверхности разливочных огнеупоров, поскольку этот морфологический тип в составе отложений занимает значительную долю. Последнее обстоятельство хорошо согласуется с известной склонностью Al_2O_3-содержащих включений интенсивно образовывать кластеры на межфазных границах [14, с. 14; 5]. Формирование кластеров, таким образом, является, предположительно, одним из этапов формирования отложений. Тогда исследования механизма кластеризации можно считать составной частью разработки новой физико-химической модели формирования отложений. В этой связи следует отметить, что многие исследователи отмечают, что понимание механизма кластеризации кристаллических включений Al_2O_3 в стали является критически важным, а исследования в этом направлении – приоритетными [5, 11, 15, 16]. В отсутствие же удовлетворительных модельных представлений по процессам кластеризации при рассмотрении вопросов, связанных с кластерами в стали, некоторые исследователи вынужденно используют положения фрактальной теории.

Известно, что коралло-подобные кластеры, являясь продуктом коагуляции кристаллических индивидов, также как дендритные и пластинчатые включения, формируются в условиях развитой турбулентности и значительных химических пересыщений [10], то есть в неравновесных условиях. Учитывая, что размер большинства индивидуальных включений, из

которых образованы кластеры в стали, находится в диапазоне 1–4 мкм [6], а также рост скорости образования кластеров с ростом степени турбулентности потоков, можно считать, что коагуляция при кластеризации является преимущественно ортокинетической [9, с. 77]. Можно предположить, что коралло-подобные кластеры в стали формируются в зонах с изотропной турбулентностью при отсутствии определенного направления турбулентной диффузии. Напротив, в отложениях коралло-подобные кластеры могут формироваться в условиях, когда направление набегающих потоков к поверхности разливочных огнеупоров в локальных зонах изменяется незначительно. Эти отличия в условиях формирования коралло-подобных кластеров обуславливают указанные в Сообщении 1 некоторые различия в строении коралло-подобных кластеров в стали и в отложениях.

При этом следует учитывать, что локальные турбулентные характеристики потока в различных областях огнеупоров из-за существования зон отрывных, обратных течений и других особенностей могут заметно отличаться, что не может не влиять как на морфологические особенности включений уже в составе отложений, так и на скорость их формирования. Известно, например, что для зон отрывных течений, где гидродинамические параметры потоков очень нестабильны, характерно наиболее интенсивное формирование отложений [12, 14].

Для объяснения различной склонности к кластеризации разных морфологических типов кристаллических Al_2O_3-содержащих включений в стали исследователями из Левенского университета (Бельгия) было предложено использовать «кавитационный» механизм [15, 16]. Суть «кавитационного» механизма состоит в том, что в несмачивающихся дисперсных системах жидкость может самопроизвольно выталкиваться из зазора между двумя разъединяемыми частицами, образуя кавитационную полость с разрежением. Предложенный механизм, на наш взгляд, является достаточно дискуссионным. Важно, в частности, отметить, что возникновение кавитационной полости, препятствующей нарушению коагуляционного контакта между плохо смачиваемыми сталью включениями, возможно только на этапе их разъединения. То есть этап их сближения и формирования коагуляционного контакта включений остается вне поля зрения. Кроме того, при расчетной оценке кавитационного эффекта используются схемы контакта включений разной морфологии по вариантам «сфера-сфера», «плоскость-сфера», «плоскость-плоскость», где под плоскостью подразумевается грань идиоморфного или пластинчатого включения. В реальности же контакт, например сферических с идиоморфными или пластинчатыми включениями происходит, как правило, по вершинам и ребрам многогранников и боковым кромкам пластинчатых включений (рис. 1). Этот факт авторами «кавитационного» механизма кластеризации включений в стали, к сожалению, не принят во внимание.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Особенности контактирования Al_2O_3-содержащих включений в стали [3, 11, 15]: *а, б* – сфера-полиэдр; *в* – полиэдр-полиэдр; *г* – пластинчатое включение-полиэдр и пластинчатое-пластинчатое включения (пластинчатые включения показаны стрелками)

Кроме того, в расчетных оценках прочности контакта авторы не учитывают фактор динамического воздействия со стороны потоков. Поскольку формирование кластеров, как отмечалось выше, происходит в условиях интенсивной конвекции и развитой турбулентности как при раскислении стали на выпуске, так и при формировании отложений в разливочных огнеупорах, то необходимость учета фактора гидродинамики при выполнении расчетов по «кавитационному» механизму кластеризации представляется достаточно обоснованным замечанием.

В модельных представлениях по кластеризации кристаллических включений в стали, сопровождающейся образованием характерных пространственных структур, на наш взгляд, следует исходить из следующих базовых принципов:

1. На поверхности кристаллических включений в стали, являющихся в ней диспергированной фазой, имеются адсорбционные слои и смачивающие (сольватные) пленки [13, с. 167–169; 17; 9; 18, с. 184], что придает стали свойства структурированной жидкости, не подчиняющейся законам Эйнштейна и Ньютона для течения жидкостей. Адсорбционно-сольватный фактор крайне характерен для дисперсных систем [19, 20, 21]. Средняя расчетная толщина таких пленок для включений Al_2O_3 в стали при T = 1550 °С составляет, например, 46 мкм [22]. Эти пленки имеют высокую устойчивость и являются своего рода барьером, который препятствует непосредственному контакту и быстрой коагуляции включений [18, с. 183; 21].

2. Al_2O_3-содержащие включения в стали имеют преимущественно анизометрическую форму вследствие бочковидного объемного, иногда уплощенного габитуса кристаллов корунда (гексаэдрические бипирамиды, в том числе усеченные, призмы и пластины псевдогексагонального облика [7]), что способствует их кластеризации и формированию характерной для коралло-подобных структур в стали пространственной конфигурации.

3. Грани кристаллов энергетически неравноценны, что обусловлено различиями в атомной структуре и количестве ненасыщенных электронных связей поверхности граней, определяющих величины их поверхностных энергий. Из-за анизотропии каждая грань, согласно закону Г. Вульфа, имеет характерную для нее поверхностную энергию [21]. Равновесная форма кристаллов является результатом стремления к минимуму их поверхностной энергии.

4. С течением времени происходит трансформация первичных кластеров по механизму Оствальдовского созревания из структур коагуляционного типа в структуры конденсационно-кристаллизационного типа, сопровождающаяся их упрочнением.

Наличие на преимущественно лиофилизированной поверхности анизометрических кристаллов относительно лиофобных участков выступает в качестве существенного условия образования разветвленных пространственных структур из них, поскольку точечные контакты и формирование первичных кластерных цепочек возникают именно по этим лиофобным участкам. Центры точечных контактов возникают на участках с высокой кривизной поверхности, а именно по ребрам, углам, а также торцевым участкам кристаллов, где имеются максимумы поверхностной энергии, а действие адсорбционно-сольватного фактора ослаблено [21]. В то же время у сферических Al_2O_3-содержащих включений, которые демонстрируют в стали высокую устойчивость к кластеризации, сольватная оболочка однородна по всей поверхности включения, что создает сплошной и равномерный экранирующий эффект и не способствует образованию стабильных контактов между включениями.

На первом этапе формирования кластеров (агрегатов) из кристаллических включений в стали они представляют структуры коагуляционного типа, где первичный контакт между включениями, обусловленный вандерваальсовыми силами, характеризуется относительно невысокой прочностью. На втором этапе, предположительно, происходит их трансформация из структур коагуляционного типа в более прочные структуры конденсационно-кристаллизационного типа. Упрочнение достигается в результате зарастания узких перешейков в местах первичных коагуляционных контактов включений вследствие переконденсации, обусловленной действием эффекта Гиббса–Томсона (Кельвина), с образованием более прочных химических связей. При этом происходит утрата исходной геометрии входящих в них включений разной морфологии. В частности, растворяются вершины и ребра кристаллов, утолщаются области их контактов, и формируется характерный для коралло-подобных кластеров облик (рис. 2). Упрочнение кластеров нивелирует фактор гидродинамики, что способствует заметному увеличению их размеров по сравнению с первичными агрегатами. Насколько нам известно, такой механизм кластеризации кристаллических Al_2O_3-содержащих включений в стали предложен впервые.

Таким образом, в соответствии с преобладающими морфологическими типами включений и структур, присутствующих в отложениях, формирование последних происходит по механизмам: 1) кластеризации (коагуляция в сочетании с последующей переконденсацией) индивидуальных включений с различной морфологией, образовавшихся непосредственно в процессе разливки; 2) кристаллизационного роста

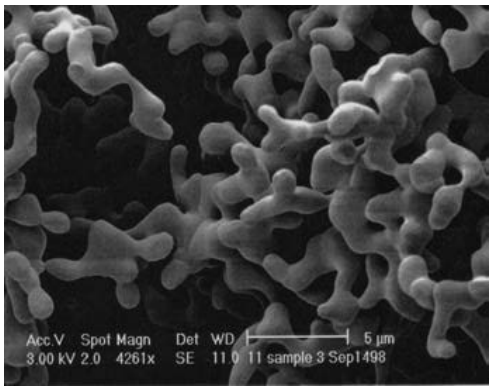


Рис. 2. Типичная структура коралло-подобного кластера Al_2O_3-содержащих включений в стали [5]

(конденсациии). Первый механизм распространяется на кластерные структуры, второй – на дендритные и пластинчатые структуры. Некоторые исследователи считают, что преимущественным механизмом формирования отложений является механизм кристаллизационного (диффузионного) роста включений [10]. В процессе эволюции отложений, вероятно, может происходить срастание (зарастание) присутствующих в отложениях структур разных морфологических типов.

Согласно хорошо согласующихся с данными экспериментальными исследованиями результатов численного моделирования процессов нуклеации и роста включений Al_2O_3 при раскислении стали, базирующегося на термодинамическом анализе и классической теории гомогенного зарождения и роста новой фазы, длительность формирования включений с размерами несколько десятков мкм, характерных для дендритов, составляет до 100 с [6]. Этот период времени заметно превосходит длительность нахождения металла в разливочных огнеупорах. Следовательно, дендритные и пластинчатые включения, характерные для отложений и формирующиеся по механизму кристаллизационного роста, не могут быть ни продуктами раскисления, ни вторичного окисления стали, например на участке «промковш-кристаллизатор». Они, очевидно, могут формироваться непосредственно на межфазной поверхности «огнеупор (отложения) – расплав» в разливочных огнеупорах, где должны быть значительное химическое пересыщение реагентов и вектор их диффузии.

Время формирования небольших (до 2–5 мкм) включений, в том числе идиоморфных, согласно упомянутым выше результатам моделирования, не превышает 6 с [6]. Учитывая, что: 1) диапазон (2–5) мкм полностью соответствует размерам входящих в кластеры индивидуальных кристаллов; 2) длительность коагуляции и срастания включений размером 10 мкм между собой не превышает 0,03 с [1], можно заключить, что к морфологическим типам включений, которые способны формироваться непосредственно в разливочных огнеупорах, например, в рециркуляционных зонах погружных стаканов, можно отнести: 1) мелкие одиночные включения; 2) кластеры, состоящие из таких включений. Учитывая фактические температуры разливки и размер включений (до 2–5 мкм), входящих в состав кластеров, время формирования и коагуляции (спекания) включений будет меньше указанных выше временных интервалов – соответственно, 6 и 0,03 с.

Это предположение хорошо согласуется с результатами промышленных исследований, которые, как отмечалось ранее, показали: 1) заметную склонность Al_2O_3 включений к кластеризации на межфазных границах; 2) присутствие коралло-подобных кластеров в стали практически сразу после присадки алюминия на выпуске плавки [3, 10].

Выводы

В работе, на основании уточненных представлений о закономерностях формирования различных морфологических типов включений, присутствующих в стали и отложениях, а также результатов промышленных исследований и численного моделирования процессов нуклеации и роста включений Al_2O_3 при раскислении стали, обосновано предположение о том, что формирование отложений может происходить по двум механизмам: 1) кластеризации индивидуальных включений, образовавшихся в непосредственно в процессе разливки; 2) кристаллизационного роста преимущественно дендритных и пластинчатых структур непосредственно на межфазной поверхности «огнеупор (отложения) – расплав».

Учитывая, что процесс кластеризации кристаллических включений Al_2O_3 в стали можно считать составной частью формирования отложений, авторами впервые предложены базовые принципы механизма кластеризации кристаллических Al_2O_3-содержащих включений в стали. Их использование дает возможность объяснить особенности формирования и строения таких кластеров.

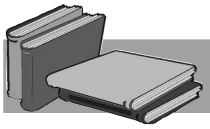
С учетом полученных выводов уточнены контуры предлагаемой к разработке (Сообщение 1), в дополнение к существующим, новой физико-химической модели явления формирования отложений в огнеупорах при разливке стали. Основные результаты и принципиальные отличия по новой модели будут представлены в следующих номерах журнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rackers, K.G., Thomas, B.G*. Clogging in continuous casting nozzles. *78th Steelmaking Conference Proceedings*, USA. 1995. Vol. 78. P. 723-734. URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html.
2. *Smith, J.D., Peaslee, K.D., Van Aken, D.C.* Steelmaking nozzles that resist clogging. Final report. University of Missouri at Rolla. USA. Jule 2006. 275 p.
3. *Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P.* et al. Non-metallic inclusions in aluminium killed steels. *Ironmaking and Steelmaking*. 2002. Vol. 29. No. 6, P. 437.
4. *Thomas, B.G.* et al. Tundish Nozzle Clogging – application of computational models. *18rd PTD Conf.* Proc., USA. 2001. Vol. 18. URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html.
5. *Zhang, L., Thomas, B.G.* Inclusions in continuous casting of steel. *XXIV National Steelmaking Symposium*, Mexico. 2003. P. 138–183. URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html.

6. *Zhang, L., Pluschkell, W., Thomas, B.G.* Nucleation and growth of alumina inclusions during steel deoxidation. *85th Steelmaking Conference,* USA. 2002. Vol. 85, ISS. P. 463–476. URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html.
7. *Черкасова Т.Ю.* Основы кристаллографии и минералогии: учебное пособие. Томский политехнический университет. Томск: ТПУ. 2014. 207 с.
8. *Van Ende, M.-A., Guo, M., Proost, J.* et al. Formation and morphology of Al_2O_3 inclusions at the onset of liquid Fe deoxidation by Al addition. *ISIJ Int,* 2011. Vol. 51. No. 1. P. 27–34.
9. *Поволоцкий Д.Я.* Раскисление стали. М.: Металлургия. 1972. 208 с.
10. *Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P.* et al. A morphological comparison between inclusions in aluminium killed steels and deposits in submerged entry nozzle. *Steel Research*. 2003. Vol. 74. No. 6. P. 351–355.
11. *Zheng, L., Malfliet, A., Wollants, P.* et al. Effect of interfacial properties on the clustering of alumina inclusions in molten iron. *ISIJ Int.* 2015. Vol. 55. P. 1891–1900.
12. Development of submerged entry nozzles that resist clogging. Final Report. AISI. Pittsburgh. USA. Oct. 2002. 229 p.
13. *Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я.* Теоретические основы электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия. 1987. 272 с.
14. New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality. Final report. Luxembourg: Publications Office of the EU. 2012. 182 p.
15. *Zheng, L., Malfliet, A., Wollants, P.* et al. Effect of alumina morphology on the clustering of alumina inclusions in molten Iron. *ISIJ Int.* 2016. Vol. 56. Iss. 6. P. 926–935.
16. *Zheng, L.* Effect of interfacial properties on the characteristics of non-metallic inclusions in steel. Ph.D. Thesis, Leuven Catholic University, Belgium. 2016. 232 p.
17. *Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Ефимова В.Г.* и др. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали. Киев: Наукова думка. 2018. 264 с.
18. *Явойский А.В., Харлашин П.С., Чаудри Т.М.* Научные основы современных сталеплавильных процессов. Мариуполь: ПГТУ. 2003. 276 с.
19. *Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В.* и др. Жидкая сталь. М.: Металлургия. 1984. 208 с.
20. *Писарский С.Н., Смирнов А.Н., Рябый Д.В.* и др. Оценка технологических возможностей стабилизации скорости разливки открытой струей на современной сортовой МНЛЗ. *Металл и литье Украины*. 2018. № 3–4. С. 28–33.
21. *Вережников В.Н.* Избранные главы коллоидной химии. Воронеж: ИПЦ ВГУ. 2011. 188 с.
22. *Новохатский И.А., Шульте А.Ю., Ярошенко И.В.* Формы существования и всплываемость оксидных дисперсий в жидких металлах. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2001. № 9. С. 3–7.

Поступила 04.04.2019



REFERENCES

1. *Rackers, K.G., Thomas, B.G.* (1995). Clogging in continuous casting nozzles. *78th Steelmaking Conference Proceedings,* USA, vol. 78, pp. 723–734 URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html [in English].
2. *Smith, J.D., Peaslee, K.D., Van Aken, D.C*. (2006). Steelmaking nozzles that resist clogging. Final report. University of Missouri at Rolla, USA. 275 p. [in English].
3. *Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P.* et al. (2002). Non-metallic inclusions in aluminium killed steels. *Ironmaking and Steelmaking,* vol. 29, no. 6, p. 437 [in English].
4. *Thomas, B.G.* et al. (2001). Tundish nozzle clogging – application of computational models. *18rd PTD Conf. Proc.*, Baltimore, USA, vol. 18, URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html [in English].
5. *Zhang, L., Thomas, B.G.* (2003). Inclusions in continuous casting of steel. *XXIV National Steelmaking Symposium,* Mexico, pp. 138–183 URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html [in English].
6. *Zhang, L., Pluschkell, W., Thomas, B.G.* (2002). Nucleation and growth of alumina inclusions during steel deoxidation. *85th Steelmaking Conference*, USA, vol. 85, ISS, pp. 463–476, URL: http://ccc.illinois.edu/publications.html [in English].
7. *Cherkasova, T.Yu.* (2014). Basics of crystallography and mineralogy: a tutorial. Tomsk Polytechnic University. Tomsk: TPU Publishing House, 207 p. [in Russian].
8. *Van Ende, M.-A., Guo, M., Proost, J.* et al. (2011). Formation and morphology of Al_2O_3 inclusions at the onset of liquid Fe deoxidation by Al addition. *ISIJ Int,* vol. 51, no. 1, pp. 27–34 [in English].
9. *Povolotskiy, D.Ya.* (1972). Deoxidation of steel. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
10. *Dekkers, R., Blanpain, B., Wollants, P.* et al. (2003). A morphological comparison between inclusions in aluminium killed steels and deposits in submerged entry nozzle. *Steel Research*, vol. 74, no. 6, pp. 351–355 [in English].
11. *Zheng, L., Malfliet, A., Wollants, P.* et al. (2015). Effect of interfacial properties on the clustering of alumina inclusions in molten iron. *ISIJ Int.*, vol. 55, pp. 1891–1900 [in English].
12. Development of submerged entry nozzles that resist clogging. (2002). Final Report. AISI. Pittsburgh, USA, 229 p. [in English].
13. *Grigoryan, V.A., Belyanchikov, L.N., Stomakhin, A.Ya*. (1987). Theoretical foundations of the electric steel melting processes. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
14. New strategies for clogging prevention for improved productivity and steel quality (2012). Final report. Luxembourg: Publications Office of the EU, 182 p. [in English].
15. *Zheng, L., Malfliet, A., Wollants, P.* et al. (2016). Effect of alumina morphology on the clustering of alumina inclusions in molten iron. *ISIJ Int,* vol. 56, iss. 6, pp. 926–935 [in English].
16. *Zheng, L.* (2016). Effect of interfacial properties on the characteristics of non-metallic inclusions in steel. Ph.D. Thesis, Leuven Catholic University, Belgium, 232 p. [in English].

17. *Dubodelov, V.I., Smirnov, A.N., Yefimova V.G.* et al. (2018). Hydrodynamic and physico-chemical processes in tundishes for continuous casting of steel. Kyiv: Naukova dumka, 264 p. [in Russian].
18. *Yavoyskiy, A.V., Kharlashin, P.S., Chaudri, T.M.* (2003). Scientific bases of modern steelmaking processes. Mariupol': publishing house PSTU, 276 p. [in Russian].
19. *Baum, B.A., Khasin, G.A., Tiagunov, G.V.* et al. (1984). Liquid steel. Moscow: Metallurgiya, 208 p. [in Russian].
20. *Pisarskii, S.N., Smirnov, A.N., Ryabyy, D.V.* et al. (2018). Estimation of technological possibilities of the speed stabilization of casting by open jet on modern billet CCM. Report 1. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 3–4, pp. 22–27 [in Russian].
21. *Verezhnikov, V.N.* (2011). Selected chapters of colloidal chemistry. Voronezh: publishing house of VSU. 188 p. [in Russian].
22. *Novokhatskiy, I.A., Shul'te, A.Yu., Yaroshenko, I.V.* (2001). Forms of existence and floating of oxide dispersions in liquid metals. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*, no. 9, pp. 3–7 [in Russian].

Received 04.04.2019

Анотація

С.М. Писарський[1], інженер машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), e-mail: serge.pisarsky@gmail.com; **О.М. Смірнов**[2], д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр., e-mail: stalevoz@i.ua

[1]Standart Metallurgical Company, Лагос, Нігерія
[2]Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

Дослідження сучасних уявлень про природу формування відкладень в вогнетривах при розливанні сталі. Повідомлення 2

У Повідомленні 2 (Повідомлення 1, «Металл и литье Украины» № 1–2, 2019) продовжено аналітичні дослідження з важливих і мало вивчених аспектів формування відкладень в вогнетривах систем розливання. Оскільки відкладення складаються, в основному, з корало-подібних кластерів, дендритних та близьких до них пластинчастих структур, а також, з огляду на різноманіття і в ряді випадків суперечливість уявлень щодо механізмів їх формування, в статті проаналізовано чинники і закономірності формування цих морфологічних типів. Показано, що при формуванні кристалічних структур пластинчастого типу важливу роль відіграє явище інгібування окремих граней кристалів поверхнево-активними в залізі домішками. Беручи до уваги результати промислових досліджень і чисельного моделювання процесів нуклеації і зростання включень Al_2O_3 при розкисленні сталі, у Повідомленні 2 обґрунтовано висновок про те, що дендритні і пластинчасті структури в відкладеннях не можуть бути результатом осадження ні продуктів розкислення, ні вторинного окислення сталі. Вони можуть формуватися безпосередньо на міжфазній поверхні «вогнетрив (відкладення) – розплав» в вогнетривах систем розливання за механізмом кристалізаційного зростання.
Відносно корало-подібних кластерів з урахуванням наявних критичних зауважень до відомого «кавітаційного» механізму кластеризації кристалічних Al_2O_3-містних включень в сталі, запропоновано якісно нові підходи для розробки нової моделі кластеризації. В її рамках отримує задовільні пояснення ряд характерних особливостей формування та просторової структури таких кластерів (контакт включень анізометричної форми переважно по вершинах, ребрах, бічних крайках багатогранників і пластинчастих включень; низька схильність до коагуляції сферичних включень; висока міцність кластерів, що перешкоджає їх руйнуванню в турбулентних потоках та ін.). Показано, що процес кластеризації є складовою частиною формування відкладень.
Результати виконаних досліджень дозволили уточнити контури пропонованої до розробки нової фізико-хімічної моделі явища формування відкладень в вогнетривах при розливанні сталі.

Ключові слова

Розливання сталі, формування відкладень, включення, дендрити, пластинчасті включення, інгібування, кластеризація, адсорбціонно-сольватний фактор, анізометрія, кристалізаційне зростання, переконденсація.

Summary

S.N. Pisarskii[1], Engineer of continuous casting machine (CCM), e-mail: serge.pisarsky@gmail.com; **A.N. Smirnov**[2], Doctor of Engineering Sciences, Prof., Leading Researcher, e-mail: stalevoz@i.ua

[1]Standart Metallurgical Company, Lagos, Nigeria
[2]Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The study of modern concepts about the nature of deposits in refractories during casting of steel. Report 2

Report 2 (Report 1, "Metall i lit'e Ukrainy", № 1–2, 2019) continued analytical studies on important and poorly studied aspects of the deposit formation in refractories for casting systems. Since the deposits consist mainly of coral-like clusters, dendritic and lamellar structures close to them, and taking into account the diversity and in some cases the inconsistency of ideas on the mechanisms of their formation, the article analyzed the factors and regularities of these morphological types formation. It has been shown that the phenomenon of inhibition of individual crystal faces by surface-active impurities in iron plays an important role in the formation of the plate type crystalline structures. Taking into account the results of industrial studies and numerical modeling of the nucleation and growth of Al_2O_3 inclusions during the steel deoxidation, in Report 2 the conclusion is substantiated that dendritic and lamellar structures in deposits cannot be the result of deposition neither of the deoxidation product nor products of secondary oxidation of steel. They can be formed directly on the interfacial surface "refractory (deposits) – melt" in refractories for casting systems by the mechanism of crystallization growth.

With regard to coral-like clusters, taking into account the available criticisms of the well-known "cavitation" clustering mechanism of crystalline Al_2O_3-containing inclusions in steel, qualitatively new approaches are proposed for developing a new clustering model. Within its framework, a number of characteristic features of the formation and spatial structure of such clusters are given satisfactory explanations (contact of inclusions of anisometric shape mainly along vertices, edges, lateral edges of polyhedrons and lamellar inclusions; low tendency to coagulation of spherical inclusions; high strength of clusters preventing their destruction in turbulent flows etc.). It is shown that the clustering process is an integral part of the formation of deposits.

The results of the studies have permit to clarify the contours of the proposed for the development of a new physicochemical model of the phenomenon of the deposit formation in refractories during steel casting.

Keywords

Steel casting, formation of deposits, inclusions, dendrites, lamellar inclusions, inhibition, clustering, adsorption-solvation factor, anisometry, crystallization growth, recondensation.

УДК 621.74

О.И. Пономаренко[1], д-р техн. наук, проф., проф. кафедры литейного производства, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3043-4497

О.П. Косенко[2], специалист по разработке и внедрению технологических процессов, e-mail: olegkossenko@gmail.com

М.В. Швец[1], преподаватель-стажер, e-mail: shvecjr@gmail.com

С.Д. Евтушенко[1], студент

[1]Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина
[2]АО "Харьковский машиностроительный завод «Свет шахтера», Харьков, Украина

Применение компьютерно-интегрированного проектирования для нетехнологичных отливок шахтного оборудования

В данной статье показана возможность применения компьютерно-интегрированного проектирования для получения нетехнологичных отливок высокого качества для шахтного оборудования. Использование CAD/CAE программ открывает новые возможности для инженеров-технологов и конструкторов, значительно сокращается время на разработку технологических процессов и изготовление оснастки. Это позволяет сэкономить расходы сплава за счет прогнозирования появления мест дислокации дефектов, уменьшить брак отливок, а также дает возможность проверки детали на различные виды прочностных нагрузок на ее виртуальной модели.
Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью программ Solid-Works и LVMFlow. Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обусловило появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели. Для ликвидации во внутренних углах отливки скопления газоусадочной пористости было предложено увеличить толщину ножек. Отливка имеет большую высоту. Чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла, было предложено использовать песчано-смоляную смесь.
Для ликвидации горячих трещин в отливке, при кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке. Установка экзотермических прибылей позволила увеличить эффективность работы литниково-питающей системы за счет экзотермической реакции при контакте расплава с элементом и газовым давлением в прибыли; снизить брак по дефектам усадочного характера; уменьшить металлоемкость прибыли (до 40 %) и технологические припуски на механическую обработку прибыльных мест с 15–20 мм до 4–5 мм; дало возможность установки прибылей на любой поверхности без нарушения конфигурации отливки.
Разработанный технологический процесс введен на одном из литейных предприятии Украины.

Ключевые слова: *направляющая, формовочная смесь, литейная форма, модельный комплект, LVMFlow, SolidWorks, компьютерно-интегрированное проектирование, газоусадочная пористость, трещина.*

Литейные изделия составляют значительную долю по массе и трудоемкости изготовления любого вида продукции машиностроения. От качества отливок, их точности и экономичности в итоге зависит и качество конечной продукции – двигателей, станков, автомобилей. Как показывает мировой опыт, совершенствование изделий машиностроения невозможно без существенного повышения сложности, качества, эксплуатационных свойств, точности и уменьшения толщины стенок литых заготовок. Сегодня в практике проектирования литых деталей, а также для решения задач по моделированию процессов кристаллизации применяется ряд специализированных программных пакетов трехмерного проектирования. Учитывая, что выбор исходных параметров для компьютерного моделирования осуществляется непосредственно конструктором или технологом на основе личного опыта, бывает проблематичным заранее с большой степенью вероятности определить правильность выбранных технических решений. Вопросы, связанные с формализацией процессов локализации внутренних дефектов литейного происхождения, должны обязательно решаться на этапе компьютерного моделирования процесса кристаллизации литой детали [1, 2]. Получение качественных отливок за счет использования новых методов и

программных продуктов, таких как *SolidWorks* и *LVMFlow* являтся актуальной задачей литейного производства.

Целью исследования данной работы является применение компьютерно-интегрированного проектирования для получения нетехнологичных отливок высокого качества для шахтного оборудования, которое позволяет моделировать процесс заполнения формы расплавом и охлаждения отливки для обнаружения мест дислокации внутренних дефектов.

Подготовка производства изделия является наиболее важным этапом, во время которого определяется возможность его производства в условиях конкретного предприятия, здесь разрабатывается 3D–модель будущего изделия, производится моделирование, доводка технологии производства, выпускается технологическая документация изделия.

Одним из главных этапов изготовления изделия является способ изготовления отливки и оценка возможности изготовления на имеющемся оборудовании. Создание 3D-модели изделия происходит с помощью *CAD* пакетов разного уровня, которые бесконфликтно работают в среде *PDM* системы. В дальнейшем 3D-модель является основой для различных конструкционных расчетов с эксплуатационными нагрузками. Затем на ее основе создается 3D-модель отливки.

Далее проводится моделирование технологического процесса производства литой детали с помощью *CAE* систем. После анализа полученных результатов моделирования вносятся изменения в 3D-модели детали и отливки. Причем, при внесении некоторых поправок в 3D-модели детали, таких как дислоцированные литейные дефекты, производятся повторные конструкционные расчеты с эксплуатационными нагрузками, с последующим внесением поправок в конструкцию детали.

Из вышеперечисленного следует, что технологическое проектирование обеспечивает постоянное и полное взаимодействие технических подразделений, ответственных за выпуск технической документации для изделия. Такой подход к проектированию позволяет одновременно связывать такие параметры, как оптимальная конструкция детали, технологичность ее изготовления, а также закладывать эти параметры на этапе подготовки производства, сокращая при этом время на их проектирование.

Отливка «Направляющая» является стальной отливкой (рис. 1). Габариты 420х470х664 мм. Чистый вес заготовки составляет 361 кг. Изготавливается из

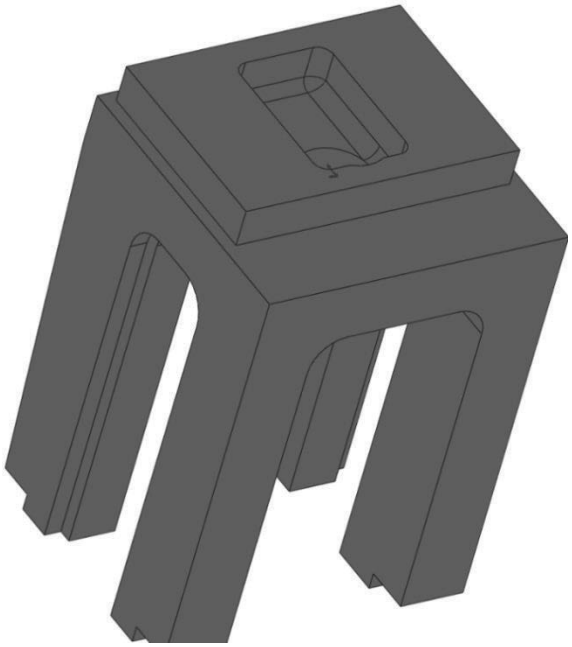


Рис. 1. Модель детали «Направляющая» с припусками

стали 35ХГСЛ ГОСТ 977-88.

Отливка «Направляющая» должна выполняться по следующим техническим условиям:

1. Отливка II группы ГОСТ 977-88.
2. Точность отливки 12-0-0-12 по ГОСТ 2009-75.
3. Формовочные наклоны по ГОСТ 3212-80, тип I, II.
4. Неуказанные литейные радиусы 10–15 мм.
5. Остатки дополнений, технологические стяжки, остатки литниковой системы удалить Rz80 мкм.

Отливка имеет большую высоту, что требует специальных составов формовочных и стержневых смесей, чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла. Было предложено использовать песчано-смоляную смесь.

Формовочная смесь готовится в смесителе "*AMDR8*" фирмы "*OMEGA*". Состав смесей приведен в табл. 1.

Газообразующая способность, $см^3/г$ – не более 10.

Газопроницаемость смеси, ед. – не менее 200.

Осыпаемость, % – не более 0,5.

С понижением температуры окружающей среды необходимо увеличивать содержание катализатора [3].

Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обуславливает появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели.

Таблица 1

Состав смесей

Состав смеси	1 – программа	2 – программа	3 – программа
Песок формовочный, К016	100 %	–	5–10 %
Регенерат (восстановленный песок)	–	100 %	95–90 %
Смола "*ASKURAN*"-*381* фирма *Ashland*	1,0–1,1 % более 100 %	0,9–0,7 % более 100 %	1,0–0,8 % более 100 %
Отвердитель (катализатор), *HARTER RAPID* 05	0,6–0,5 % более 100 %	0,5–0,4 % более 100 %	0,5–0,4 % более 100 %

Однако при первичном проливании во внутренних углах отливки наблюдалось скопление газоусадочной пористости. Чтобы исключить ее появление, было предложено увеличить толщину ножек.

Кроме того, во время кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками может возникнуть значительное напряжение, которое может привести к появлению горячих трещин в отливке. Чтобы этого не происходило, было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке, однако вызвало потребность в усложнении конструкции стержневого ящика.

Проектирование начинается с выбора места разъема модели и формы (рис. 2), было решено ответственную часть отливки «Направляющая» расположить в нижней полуформе. При данном размещении отливки используется минимальное количество литейных стержней и проходит равномерно направленная кристаллизация, что обеспечивает снижение брака через отсутствие усадочных раковин, пористости и недоливов [4].

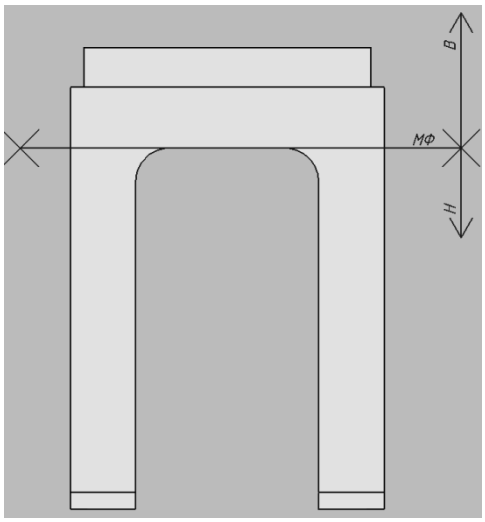


Рис. 2. Разъем отливки «Направляющая»

Класс точности размеров и ряд припусков на механическую обработку был выбран по ГОСТ 2009-75. Класс точности – 12, ряд припусков – 3.

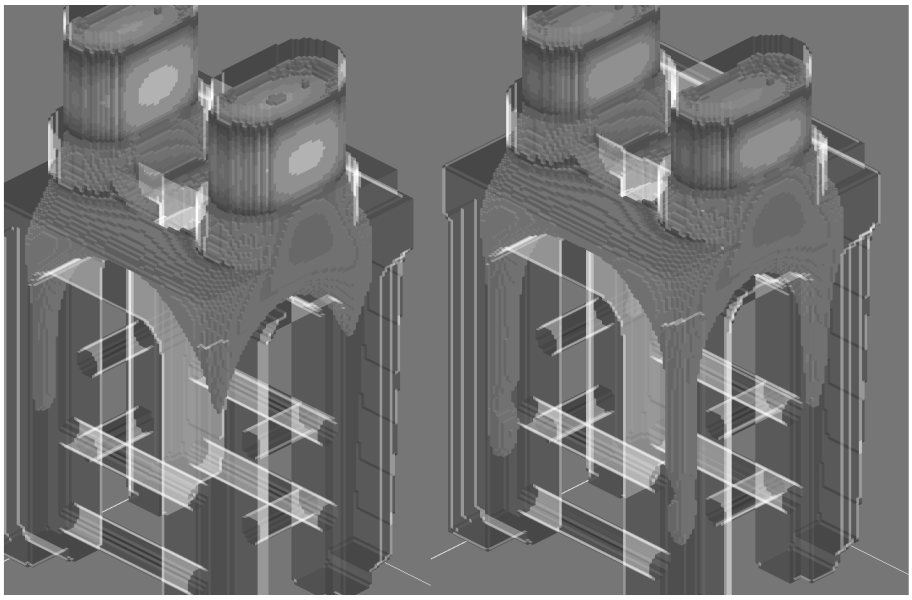
Для определения припусков на механическую обработку использовали ГОСТ 2009-75. Однако для плавного протекания кристаллизации и уменьшения внутренней усадки, припуски были увеличены в два раза, так как при компьютерном моделировании было обнаружено, что такое действие способствует качественному изготовлению отливки [5]. Результат компьютерного моделирования по расчету припуска на механическую обработку приведен на рис. 3.

Допуск габаритных размеров отливки – 8 мм по ГОСТ 2009-75.

Точность изготовления отливок во многом определяется точностью установки стержней в форму и их фиксацией при сборке. Точность установки стержня обеспечивается конфигурацией его знаков, их размерами, которые назначают по ГОСТ 3606-80 с учетом размеров стержня, способа формирования и его положения в форме [5].

Размеры стержня: длина – 512 мм, ширина – 418 мм, высота – 670 мм. Высота стержневого знака – 50 мм. Формовочный уклон знака составляет 5 мм кругом. Зазор стержневого знака – 1 мм. Для изготовления стержней для отливки «Направляющая» применяют разъемный стержневой ящик.

Учитывая тип производства, все модельное оснащение для получения отливки «Направляющая» изготавливаем деревянным. Деревянные модельные комплекты, в отличие от металлических, более дешевые, простые в изготовлении и использовании, легкие. Модели отливки и прибыли выполнены полыми и снабжены ребрами жесткости, с целью придания им большей жесткости. При определении размеров деревянной модели учитываем суммарную усадку сплава модели и сплава отливки. В данном случае усадка на модели равна 2 %. Кроме того, модель, кроме учета усадки, изготавливается с припуском на механическую обработку, а также с уклонами и зазорами для знаков стержней, галтелями. Формовочный уклон на формообразующих поверхностях модельных комплектов составляет 1° 13' [6].



а *б*

Рис. 3. Компьютерное моделирование припуска на механическую обработку: *а* – припуск увеличен в 2 раза; *б* – припуск по ГОСТ 2009-75

После заливки формы отливка охлаждается и затвердевает. Полностью затверделая отливка должна некоторое время охлаждаться с формой, поскольку прочность металла при высоких температурах мала, и отливка может разрушаться при выбивании ее из формы. Кроме того, выбивка отливки при высокой температуре нежелательна, поскольку охлаждение ее на воздухе протекает неравномерно:

тонкие частицы охлаждаются значительно быстрее массивных, что вызывает появление в отливках внутреннего напряжения, искажения отливок и даже трещины [7].

Продолжительность охлаждения отливки в форме, согласно справочнику Могилева «Зависимость продолжительности охлаждения отливки из стали до выбивки из формы», составляет 7 часов [8].

Для снижения литейного напряжения, стабилизации размеров, снижения твердости, улучшения обрабатываемости, повышения механических свойств, износостойкости отливок, необходимо провести термическую обработку.

Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью программ *SolidWorks* и *LVMFlow*.

Данная отливка моделировалась в программе *SolidWorks* методом твердотельного моделирования. В процессе работы рассмотрен метод вырезания конструктивных элементов из большого болвана, процесс создания 3D-модели отливки показан на рис. 4. Модель выполнена в 18 шагов.

Также для симуляции процесса кристаллизации были созданы модели экзотермических вставок (рис. 5). Технология изготовления отливки с использованием экзотермических вставок позволяет значительно уменьшить трудоемкость и себестоимость изготовления отливки, по сравнению с похожими отливками, которые изготавливались для шахтного оборудования.

После файлы моделей экзотермических вставок для проектируемой отливки были сохранены и добавлены в сборку к модели отливки (рис. 6).

После выполнения последних операций полученная сборка была сохранена в формате *STL,* поскольку симуляция кристаллизации выполнялась в программном пакете *LVMFlow*.

Было выбрано несколько типов экзотермических вставок, эффект получился разный.

Как видно на рис. 7 (*а*) – заданных экзотермических вставок *OBG7* не хватает для того, чтобы запитать всю отливку. В теле заготовки появляются усадочные раковины, что является не допустимым. В технологии с такими же экзотермическими вставками, но большей высоты *OBG7*/*300* усадка отсутствует (рис. 7, *б*). При использовании вставок *OBG7*/*300* отливка вышла высокого качества, на ней нет ни одного дефекта и технологию можно внедрять в производство.

С применением компьютерных методов моделирования отверждения отливки, был разработан технологический процесс изготовления отливки «Направляющая» из стали 35ХГСЛ. Благодаря этим методам удалось скорректировать полученную технологию и получить удовлетворительные результаты симуляции. В данной технологии мы можем наблюдать, что металл кристаллизируется постепенно без обрывов жидких фаз, которые влекут за собой дефекты усадочного характера, можно с уверенностью сказать, что отливка питается удовлетворительно, и при реальном изготовлении отливки не будет наблюдаться дефектов усадочного характера.

Выводы

1. Литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения. Удельный вес литых деталей достигает: в современных автомобилях – 25 %, в асинхронных двигателях – 60 %, в тракторах – 58 %. К качеству отливок с каждым годом предъявляют все более высокие требования. При этом необходимо снижать трудоемкость их

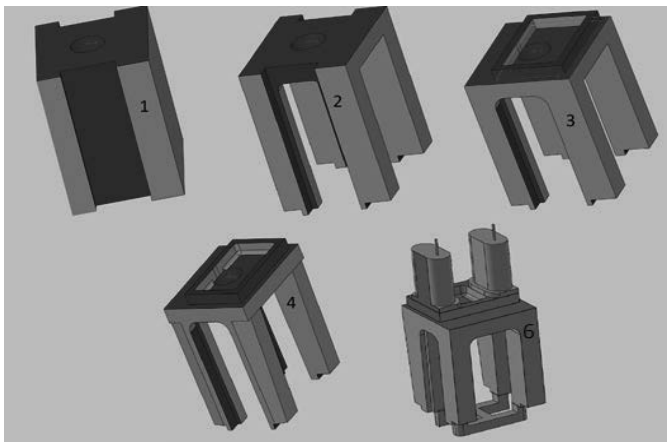


Рис. 4. Проектирование 3D-модели

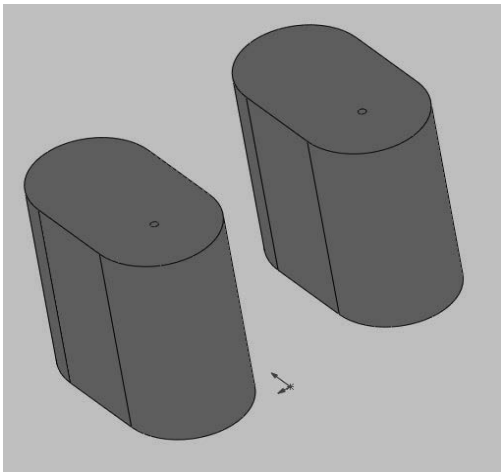


Рис. 5. 3D-модель экзотермических вставок для отливки

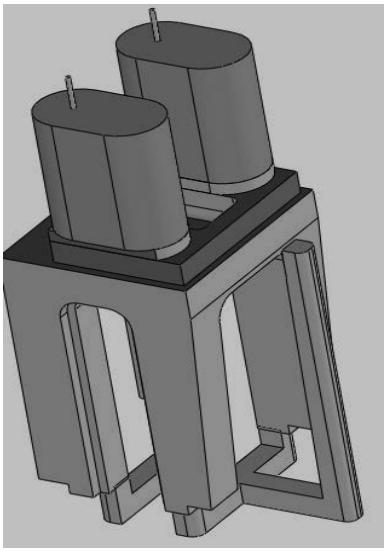
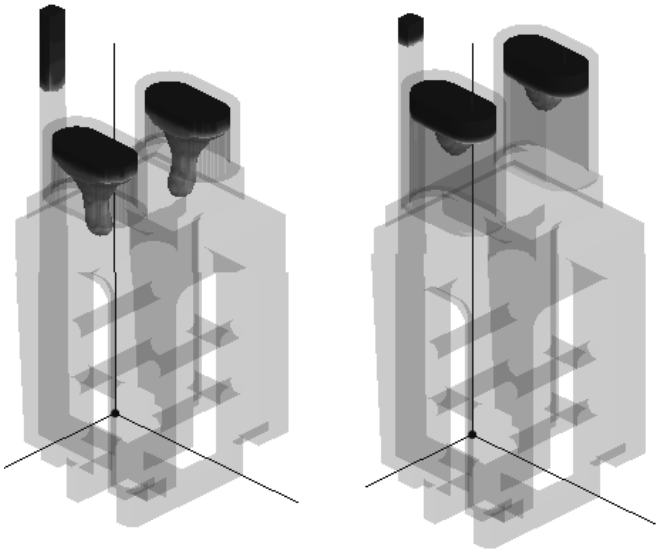


Рис. 6. Модель в сборе



а *б*

Рис. 7. Результаты проведенного расчета усадочных дефектов: *а – OBG7*; *б – OBG7/300*

изготовления, повышать производительность агрегатов и улучшать условия труда в литейных цехах.

2. Одним из возможных путей решения задачи повышения качества отливок является использование математических или компьютерно-интегрированных методов моделирования процессов, многочисленных методов расчета.

Использование *CAD*/*CAE* программ открывает новые возможности для инженеров-технологов и конструкторов, значительно сокращается время на разработку технологических процессов и изготовление оснастки. Это позволило сэкономить расходы сплава за счет прогнозирования появления мест дислокации дефектов, уменьшить брак отливок, а также дало возможность проверки детали на различные виды прочностных нагрузок на ее виртуальной модели.

3. Нетехнологическая отливка «Направляющая» была представлена в 3D системе с помощью программ *SolidWorks* и *LVMFlow*. Отливка имеет вид перевернутого табурета с четырьмя ножками. Это обусловило появление в отливке большого количества тонких и толстых стенок, которые чередуются. В местах переходов были установлены галтели. Для ликвидации во внутренних углах отливки скопления газоусадочной пористости было предложено увеличить толщину ножек.

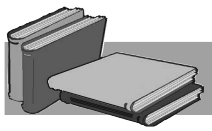
4. Отливка имеет большую высоту. Чтобы выдержать гидростатический напор заливаемого металла, было предложено использовать песчано-смоляную смесь.

5. Для ликвидации горячих трещин в отливке, при кристаллизации в местах сопряжения крышки с ножками было принято решение установить специальные стяжки между ножками. Такое технологическое решение устранило появление трещин в отливке.

6. Для технологии выбираем две экзотермические вставки моделей *OBG7* или *OBG7*/*300* (овальные открытого типа) фирмы «*Cukurova Kimya Industrisi*», предварительно определив в программе *LVMFlow*, которая из них не допустит образования усадки. Это позволило увеличить эффективность работы питательных прибылей за счет экзотермической реакции при контакте расплава с элементом и газовым давлением в прибыли; снизить брак по дефектам усадочного характера; уменьшить металлоемкость прибыли (до 40 %) и технологические припуски на механическую обработку прибыльных мест с 15–20 мм до 4–5 мм; дало возможность установки прибылей на любой поверхности без нарушения конфигурации отливки.

7. Разработанный технологический процесс введен на одном из литейных предприятий Украины.

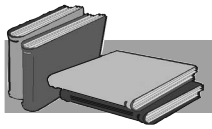
8. Данные проведенных исследований используются при преподавании курса лекций по дисциплине «*CAD/CAE* в литейном производстве».



ЛИТЕРАТУРА

1. *Алехин В.И., Акимов О.В., Марченко П.А.* Компьютерное моделирование процессов при производстве литых деталей двигателя. *Литейное производство*. 2010. № 9. С. 31–33.
2. *Алехин В.И., Белогуб А.В., Марченко А.П., Акимов О.В.* Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2009. № 2. С. 101–104.
3. *Илларионов И.Е., Васин Ю.П.* Формовочные материалы и смеси. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. 223 с.
4. *Титов Н.Д., Степанов Ю.А.* Технологии литейного производства. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
5. *Кулаков Б.А.* и др. Технология изготовления литейных форм: учеб. пособие к лабораторным и практическим занятиям. Челябинск: ЮУрГУ, 1998. 96 с.
6. *Власов А.Ф., Васильев П.В.* Справочник конструктора модельной оснастки. М.: Машиностроение, 1980. 125 с.
7. *Василевский П.Ф.* Технология стального литья. М.: Машиностроение, 1974. 408 с.
8. *Могилев В.К., Лев О.И.* Справочник литейщика. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.

Поступила 09.06.2019



REFERENCES

1. *Alekhin, V.I., Akimov, O.V., Marchenko, A.P.* (2010). Computer modeling of processes in the production of cast engine parts. *Liteinoe proizvodstvo,* no. 9, pp. 31–33 [in Russian].
2. *Alekhin, V.I., Belogub, A.V., Marchenko, A.P., Akimov, O.V.* (2009). Computer-integrated modeling of casting processes in automobile pistons based on design and technological methods for designing engine parts. *Engines of internal combustion*, no. 2, pp. 101–104 [in Russian].
3. *Illarionov, I.E., Vasin, Yu.P.* (1992). Molding materials and mixtures. Cheboksary: Publishing house Chuvash. University, 223 p. [in Russian].
4. *Titov, N.D., Stepanov, Yu.A.* (1974). Foundry technology. Moscow: Mashinostroenie, 472 p. [in Russian].
5. *Kulakov, B.A.* et al. (1988). Technology of production of casting molds: manual for laboratory and practical classes. Chelyabinsk: SUSU, 96 p. [in Russian].
6. *Vlasov, A.F., Vasil'ev, P.A. (*1980). Designer's reference book of the modern equipment. Moscow: Mashinostroenie, 125 p. [in Russian].
7. *Vasilevsky, P.F.* (1974). Steel casting technology. Moscow: Mashinostroenie, 408 p. [in Russian].
8. *Mogilev, V.K., Lev, O.I.* (1988). Caster handbook. Moscow: Mashinostroenie, 272 p. [in Russian].

Received 09.06.2019

Анотація

О.І. Пономаренко[1], д-р техн. наук, проф., проф. кафедри ливарного виробництва, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3043-4497; **О.П. Косенко**[2], фахівець з розробки та впровадження технологічних процесів, e-mail: olegkossenko@gmail.com; **М.В. Швець**[1], викладач-стажист, e-mail: shvecjr@gmail.com; **С.Д. Євтушенко**[1], студент

[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[2]АТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря», Харків, Україна

Застосування комп'ютерно-інтегрованного проєктування для нетехнологічних виливків шахтного обладнання

У даній роботі показано можливість застосування комп'ютерно-інтегрованого проектування для отримання нетехнологічних виливків високої якості для шахтного устаткування. Використання CAD/CAE програм відкриває нові можливості для інженерів-технологів і конструкторів, значно скорочується час на розробку технологічних процесів і виготовлення оснастки. Це дозволяє заощадити витрати сплаву за рахунок прогнозування появи місць дислокації дефектів, зменшити брак виливків, а також дає можливість перевірки деталі на різні види навантажень на міцність на її віртуальній моделі.

Нетехнологічний виливок «Направляючий» було представлено в 3D системі за допомогою програм SolidWorks і LVM-Flow. Виливок має вигляд перевернутого табурета з чотирма ніжками. Це зумовило появу у виливку великої кількості тонких і товстих стінок, які чергуються. У місцях переходів було встановлено галтелі. Для ліквідації у внутрішніх кутах виливка скупчення газоусадкової пористості було запропоновано збільшити товщину ніжок. Виливок має велику висоту. Щоб витримати гідростатичний напір металу, що заливається, було запропоновано використовувати піщано-смоляну суміш.

Для ліквідації гарячих тріщин у виливку, при кристалізації в місцях сполучення кришки з ніжками було прийнято рішення встановити спеціальні стяжки між ніжками. Таке технологічне рішення усунуло появу тріщин у виливку. Установка екзотермічних прибутків дозволила збільшити ефективність роботи литниково-живильної системи за рахунок екзотермічної реакції при контакті розплаву з елементом і газовим тиском в прибутку; знизити брак стосовно дефектів усадкового характеру; зменшити металоємність прибутку (до 40 %) і технологічні припуски на механічну обробку прибуткових місць з 15–20 мм до 4–5 мм; дало можливість установки прибутків на будь-якій поверхні без порушення конфігурації виливку.

Розроблений технологічний процес запроваджено на одному з ливарних підприємств України.

Ключові слова

Направляючий, формувальна суміш, ливарна форма, модельний комплект, LVMFlow, SolidWorks, комп'ютерно-інтегроване проектування, газоусадкова пористість, тріщина.

O.I. Ponomarenko[1], Doctor of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Foundry Department, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3043-4497; **O.P. Kosenko**[2], Specialist in the development and implementation of technological processes, e-mail: olegkossenko@gmail.com; **M.V. Shvets**[1], trainee teacher, e-mail: shvecjr@gmail.com; **S.D. Yevtushenko**[1], student

[1]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

[2] Public Joint-Stock Company "Kharkiv Machine Building Plant "Svet shakhtyora", Kharkiv, Ukraine

Application of computer-integrated design for non-technological castings of mine equipment

Summary

This article shows the possibility of using computer-integrated design to obtain high-quality non-technological castings for mining equipment. The use of CAD/CAE programs opens up new opportunities for process engineers and designers, significantly reduces the time to develop technological processes and manufacture of equipment. This saves the cost of the alloy by predicting the appearance of places of dislocation of defects, reduces the waste of castings, and also makes it possible to check the parts for various types of strength loads on its virtual model.

The non-technological casting "Guide" was presented in a 3D system using SolidWorks and LVMFlow programs. The casting has the form of an inverted stool with four legs. This led to the appearance in the casting of a large number of thin and thick walls that alternate. In places of transitions fillets were installed. To eliminate the accumulation of gas shrinkage porosity in the internal corners of the casting, it was proposed to increase the thickness of the legs. The casting has a great height. To withstand the hydrostatic pressure of the poured metal, it was proposed to use a sand-resin mixture.

In order to eliminate hot cracks in the casting, during crystallization in places where the lid with the legs mated, it was decided to install special ties between the legs. This technological solution eliminated the appearance of cracks in the casting. The installation of exothermic profits allowed to increase the operating efficiency of the gating system due to the exothermic reaction when the melt contacts the element and the gas pressure in the head; reduce defects on shrinkage defects; reduce the metal consumption of heads (up to 40 %) and technological allowances for the machining of head places from 15–20 mm to 4–5 mm; made it possible to install heads on any surface without disturbing the casting configuration.

The developed technological process was introduced at one of the foundries in Ukraine.

Keywords

Guide, forming mixture, casting form, model kit, LVMFlow, SolidWorks, computer-integrated design, gas-cuting porosis, crack.

УДК 669.71/339.5

В.А. Гнатуш, канд. техн. наук, независимый аналитик, e-mail: vgnatus@gmail.com
В.С. Дорошенко[1], д-р техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: doro55v@gmail.com
[1]Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

Рост производства алюминиевого литья в начале XXI века

Представлен анализ мирового рынка алюминиевых отливок в 2000–2017 гг., а также текущие тенденции в производстве, торговле, литейных технологиях и литейных сплавах. Мировой рынок отливок из алюминиевых сплавов в начале XXI века характеризуется динамизмом и возрастающим трендом. Несмотря на локальный во времени экономический кризис, в период с 2000 по 2017 гг., производство алюминиевых отливок в мире увеличилось в 2,4 раза. Основным потребителем таких отливок является транспортная отрасль (доля 75 % в 2011 г.), в том числе автомобилестроение – 57 %. Странами лидерами по производству алюминиевых отливок являются Китай, США и Япония. Литейное производство автомобильной отрасли использует прогрессивные технологии, которые постоянно совершенствуются, о чем свидетельствуют приведенные примеры отливок. Ученые создают новые технологии и литейные сплавы с повышенными эксплуатационными характеристиками, как, например, технология Rotocast, сплавы системы Al-Ce-X. Известно расширение технологии литья по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением. Опережающий рост выпуска отливок из алюминиевых сплавов в мире при некотором сокращении производства отливок из железоуглеродистых сплавов также подтверждает тематика исследований и инноваций в литейном производстве, в частности, Американской литейной ассоциации. Показаны примеры сложных по конструкции отливок из алюминиевых сплавов для моторостроения и другие корпусные детали, преимущественно полученные литьем под давлением. Значительную номенклатуру отливок из алюминиевых сплавов освоено Физико-технологическим институтом металлов и сплавов НАН Украины. Большинство таких отливок из алюминиевых сплавов изготовлено по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс). Эту технологию успешно развивает отдел под руководством проф. О.И. Шинского.

Ключевые слова: *рынок, отливки, алюминий, тенденции, производство, технологии, сплавы.*

Мировой рынок отливок из алюминиевых сплавов в течение XXI века характеризуется возрастающим трендом, несмотря на экономический кризис 2008–2009 годов. Как свидетельствуют данные «Modern Casting», в 2017 г. объем их производства составил 19,1 млн т, что в 2,4 раза превышает показатель 2000 г. (рис. 1). Очевидно, спрос потребителей на алюминиевые отливки стимулирует производство первичного алюминия. Этот тезис подтверждает и значение коэффициента корреляции между этими показателями, который составляет 0,95.

Примечательно, что после 2009 г. определенный баланс на мировом рынке между спросом и предложением первичного алюминия в годовом измерении в некоторой степени сдерживает повышение цен на Лондонской бирже металлов (ЛБМ, LME) на этот товар (см. рис. 1.)

Рассмотрим показатели основных стран производителей. В течение последних пяти лет (2013–2017 гг.) существенных изменений в топ-10 мировых производителей отливок из алюминиевых сплавов не случилось (табл. 1), что свидетельствует о стабильности рынка.

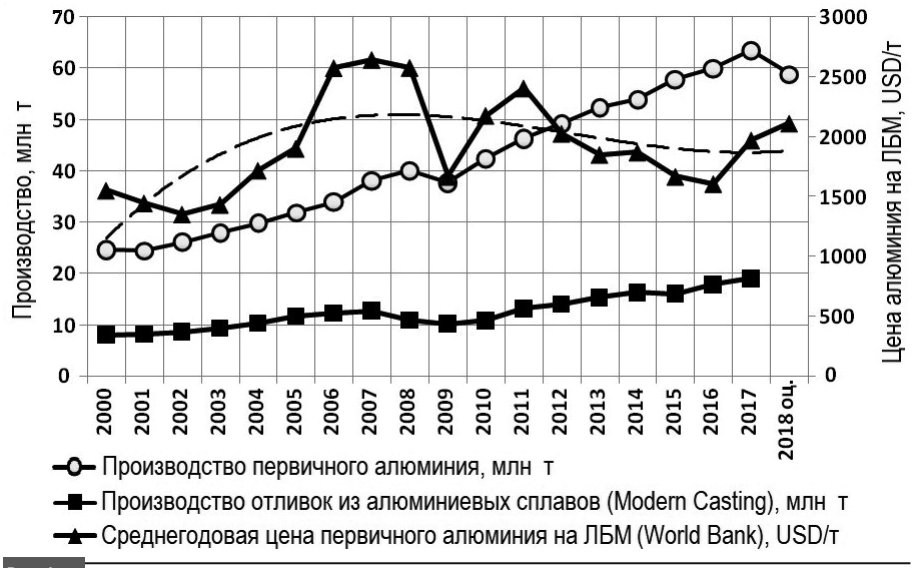


Рис. 1. Динамика мирового рынка первичного алюминия и алюминиевых оливок

Первую тройку крупных производителей алюминиевых отливок формируют Китай, США и Япония, которые своей долей по итогам 2017 г. занимали, соответственно, 38,3; 8,8 и 7,8 % мирового производства. К наиболее динамичным странам мира в сегменте алюминиевых отливок за последние пять лет следует отнести Турцию (+ 40,7 %), Китай (+ 40,4 %) и Мексику (+ 36,2 %).

Торговля алюминиевыми отливками. Согласно Украинской классификации товаров внешнеэкономической деятельности (УКТ ВЭД), алюминиевые отливки размещены в группе 76 (Другие изделия

Таблица 1

Рейтинг мировых производителей отливок из алюминиевых сплавов в 2013 и 2017 гг. [1, 2]

Топ 2013	Страна	2013		Топ 2017	Страна	2017		2017 к 2013, %
		Производство, тис. т	Доля, %			Производство, тис. т	Доля, %	
1	**Китай**	**5200,0**	**33,86**	**1**	**Китай**	**7300,0**	**38,27**	**140,4**
2	США	1682,0	10,95	2	США	1679,1	8,80	99,8
3	**Япония**	**1382,0**	**9,00**	**3**	**Япония**	**1489,7**	**7,81**	**107,8**
4	Индия	950,0	6,19	4	Индия	1305,4	6,84	137,4
5	**Германия**	**885,7**	**5,77**	**5**	**Германия**	**1137,1**	**5,96**	**128,4**
6	Италия	695,7	4,53	6	Италия	856,4	4,49	123,1
7	**Мексика, 2011**	**600,5**	**3,91**	**7**	**Мексика**	**817,9**	**4,29**	**136,2**
8	Россия	600,0	3,91	8	Россия	725,0	3,80	121,0
9	**Корея Республика**	**560,9**	**3,65**	**9**	**Корея Республика**	**629,4**	**3,30**	**112,2**
10	Польша	340,0	2,21	10	Турция	380,0	1,99	140,7
	Вместе	**12896,8**	**83,98**		**Вместе**	**16320,0**	**85,55**	**126,5**
	Другие 27 стран	2460,6	16,02		Другие 27 стран	2756,3	14,45	112,0
	Всего	**15357,3**	**100,00**		**Всего**	**19076,3**	**100,00**	**124,2**

алюминиевые) по коду 7616 99 10 00, к которому нет свободного доступа. Поэтому с определенной погрешностью можно исследовать торговлю по группе 7616, в которую входят крепежные изделия из алюминия (гвозди, болты и т. п.), ткани, решетки, сетки и ограждения из проволоки, а также алюминиевые отливки.

Сравнительный анализ рейтингов стран производителей и экспортеров/импортеров по 2017 г. (табл. 2) позволяет выявить определенные закономерности. Так, лидером среди экспортеров товаров по коду УКТ ВЭД 7616 является Китай (16,8 % мирового экспорта), а далее – Германия (10,5 %) и Италия (9,1 %). Следует отметить, что указанные страны занимают видное место и среди производителей алюминиевых отливок. Так, Китай – на первом месте, а Германия и Италия, соответственно, – на пятом и шестом местах.

Высокое 7 место среди экспортеров изделий из алюминия занимает сосед Украины – Польша (713,2 млн USD). В то время как Украина – только 63 место с объемом 3,96 млн USD. Импорт Украины в 2017 г. достиг 39,98 млн USD (43 место). Таким образом, импорт в Украину товара из алюминия по коду УКТ ВЭД 7616 в 10 раз превышает экспорт.

Литейные сплавы и технологии. Движущей силой мировой литейной промышленности является автомобильная промышленность. Представленный Metal Bulletin Research аналитический обзор свидетельствует, что на мировом рынке в 2011 г. 75 % алюминиевого литья потреблял транспорт, в том числе

Таблица 2

Сравнительные рейтинги мировых производителей отливок из алюминиевых сплавов, а также экспортеров и импортеров товаров по коду УКТ ВЭД 7616 в 2017 г.

Топ 10	Страны производители	Производство отливок, % (т)	Страны экспортеры	Экспорт товаров (код 7616), % (USD)	Страны импортеры	Импорт товаров (код 7616), % (USD)
1	**Китай**	**38,27**	**Китай**	**16,76**	**США**	**11,74**
2	США	8,80	Германия	10,49	Германия	10,80
3	**Япония**	**7,81**	**Италия**	**9,14**	**Франция**	**6,23**
4	Индия	6,84	США	7,41	Китай	5,01
5	**Германия**	**5,96**	**Франция**	**4,47**	**Мексика**	**4,58**
6	Италия	4,49	Австрия	4,14	Тайланд	3,64
7	**Мексика**	**4,29**	**Польша**	**4,05**	**Великобритания**	**2,68**
8	Россия	3,80	Тайвань, Китай	3,25	Польша	2,54
9	**Корея Республика**	**3,30**	**Чехия**	**3,14**	**Вьетнам**	**2,51**
10	Турция	1,99	Испания	2,97	Нидерланды	2,50
	Украина	**0,01**	**Украина**	**0,02**	**Украина**	**0,27**

Примечание: Исходные данные от Modern Casting [2] и International Trade Centre [3]

57 % – автомобильная промышленность [4]. Например, автопроизводитель Toyota Motor Corp. увеличила общий объем своей пятилетней программы капиталовложений для производственных и сборочных предприятий США почти до 3 миллиардов USD и объявила о новых проектах стоимостью 749 миллионов долларов в пяти местах. Эти инвестиции следуют за первоначальной программой капиталовложений на сумму 10 млрд USD, намеченной на 2017 г. В проекты включено расширение и обновление двух металлообрабатывающих заводов, находящихся в собственности Toyota, Bodine Aluminium Troy (MO) и Bodine Aluminium Jackson (TN). В частности, новые инвестиции в 62 млн USD в Bodine Aluminium Troy пойдут на оборудование для дополнительного производства 864 000 головок цилиндров для новой глобальной архитектуры Toyota (TNGA). 900 специалистов Bodine Missouri в настоящее время изготовляют более 3 млн головок цилиндров в год, которые производятся для каждой Toyota и Lexus, производимых в Северной Америке.

В Европейской автомобильной промышленности для изготовления отливок используют традиционные сплавы систем Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Si-Mg, Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu (-Mg). Наиболее распространенными являются сплавы на базе системы Al-Si. Сплавы Al-Si-Mg используются для автомобильных колес, конструкционных отливок и деталей подвески, требующих достаточно высокой прочности и пластичности. Сплавы Al-Si-Cu (-Mg) применяются для изготовления компонентов силовых агрегатов, таких как блоки двигателей, головки цилиндров, поршни и отливки, где прочность при высоких температурах и (или) износостойкость более важны, чем пластичность [5].

Рассмотрим один из примеров инновации в области автоматизации плавки и литья алюминиевых сплавов. Около трех лет назад австрийский производитель алюминиевых автомобильных колес подал заявку на установку для нового процесса плавки и обработки, интегрированных с операцией литья. По данным сайта Foundry Management & Technology (www.foundrymag.com), новый способ является «инновационным процессом литья, который будет обеспечивать механические свойства и критерии производительности, выходящие за рамки традиционных процессов литья под низким давлением». Для этого проектно-инжиниринговая фирма Future Metals Technologies GmbH разработала проект шахтной печи, которая сохраняет энергию плавления за счет загрузки материалов, предварительно нагретых направленным потоком газа от продуктов горения в печи. Печь способна плавить как слитки A356, так и лом колес со скоростью 1200 кг/ч, а также может потреблять стружку из алюминиевого сплава, полученную в процессе обработки колес, и расплавлять ее со скоростью 800 кг/ч. Все выбросы от плавления стружки улавливаются и рециркулируются. Уровень, с которого расплавленный алюминий автоматически доставляется по требованию и при заданной температуре в литейную установку, находится на высоте примерно 3,5 м. Также решены вопросы непрерывной дегазации и поддержании точных температур литья в течение всего процесса.

Для передачи колес или слитков в печь был разработан электрический погрузочный элеватор, а ванна для выдержки в печи была расширена до 5000 кг с добавлением «кармана» для размещения насоса и вихревого блока. Разработчики выбрали двухкамерный насос для высокотемпературных систем, который допускает различные характеристики перекачивания металла: он не только способен изменять скорость между циркуляцией и образованием вихря, но и позволяет использовать вторую улитку для альтернативного выхода металла через изолированный трубопровод в литейную печь. Насос обладает достаточной пропускной способностью для достижения подъемной высоты 3,5 м с перекачиванием металла автоматически на основе лазерного датчика уровня металла в литейной печи, чтобы доставлять металл порциями по 200 кг и поддерживать его постоянный уровень. Насос создает вихрь для плавления стружки с линии обработки колес. Автоматический шнек в накопительном бункере передает стружку в вихрь для быстрого плавления при погружении с контролированием лазерными мониторами уровня металла.

Печь для литья и выдержки установлена на высоте около 2,5 м над полом, имеет вместимость 2300 кг и нагревается пятью вертикальными погружными нагревателями. Короткое удлинение корпуса печи до положения разливки помогает подавать металл в камеру разливки с помощью системы стопорных стержней, приводимой в действие разливочной машиной. Эта оригинальная установка за более двух лет эксплуатации представила пример инновационного ответа на специфичные требования литейного завода, как высокопроизводительная установка без ручной обработки металла, который отвечает техническим и качественным требованиям производителя колес премиум-класса.

В последние годы на рынке литейных алюминиевых сплавов появились принципиально новые сплавы системы Al-Ce-X. Следует отметить, что редкоземельные металлы (РЗМ) имеют комплекс физико-химических свойств, которые комплексно-положительно влияют на эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов. Препятствием широкого применения РЗМ в промышленных алюминиевых сплавах является их высокая стоимость. Наиболее дешевым из них является церий, цена на который чистотой 99 % в I квартале 2019 г. составила 10–30 USD/кг на условиях FOB-Китай. В США исследованы механические свойства и микроструктуры линейки алюминиевых сплавов, легированных церием, в литом и термообработанном (T6) состояниях. Опубликованные данные свидетельствуют о том, что при нормальных условиях сплав Al-12Ce-0.4Mg имеет предел прочности при растяжения 200 МПа, а сплав Al-12Ce-4Si-0.4Mg после T6 – 252 МПа. Сплав Al-8Ce-10Mg при нормальных условиях имеет прочность при растяжении 227 МПа, а при 260 °С – 130 МПа. Установлено, что церий стабилизирует механические свойства

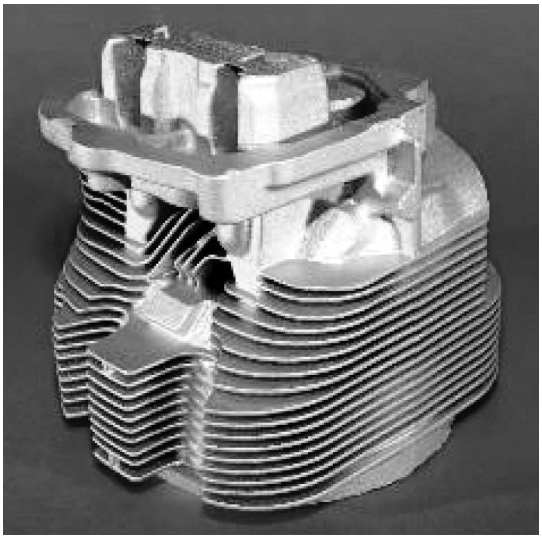


Рис. 2. Головка блока цилиндров отлита из сплава Al-8Ce [7]



Рис. 3. Головки цилиндров отлиты в песчаную форму с использованием сплава системы Al-Ce-Mg [7]

Al-Si сплавов при высоких температурах в диапазоне 200–400 °С. Поэтому их рекомендуют применять вместо стали и чугуна для деталей моторной группы, эксплуатируемых при высоких температурах (рис. 2, 3) [6, 7].

Коммерциализация сплавов системы Al-Ce-X, главным образом, зависит от стоимости церия [6]. При его стоимости менее 10 USD/кг вероятен интерес со стороны автомобильной промышленности. Если церий будет стоить в диапазоне от 10 до 20 USD/кг, то такие сплавы будут применять для техники военного назначения, чтобы уменьшить вес деталей с достаточной прочностью. Использование церия со стоимостью более 20 USD/кг может быть сосредоточено на коммерческих рынках, а также рынках авиационной и космической техники. Возможно также использование сплавов системы Al-Ce-X вместо титана. Согласно отчету USGS [8], в 2018 г. среднегодовая цена титановой губки на рынке США составила 9,2 USD/кг. Есть данные о том, что от 25 до 30 % изделий на рынке титана (4000 т в год) используются для работы в диапазоне от 150 до 315 °С, находится в пределах рабочих температур сплава системы Al-Ce-X [6].

Перспективным технологическим направлением повышения конкурентной способности алюминиевых литейных сплавов является использование наночастиц (nanoparticle Casting). Исследование различных вариантов этой технологии проводилось с начала 90-х годов XX века в исследовательских центрах США, Египта, Израиля, Украины и других стран. Полученные результаты свидетельствуют о том, что литейные алюминиевые сплавы – наночастицы находятся в начале своего «жизненного» цикла, и далеко не все их возможности определены и реализованы, особенно на уровне коммерциализации.

Европейская алюминиевая ассоциация проанализировала, какие литейные технологии используются в Европейской автомобильной промышленности для изготовления ключевых деталей двигателей [9]. По этим данным, при изготовлении алюминиевого блока цилиндров больше применяется литье под давлением, стержневая блок-система и литье под низким давлением (табл. 3).

При изготовлении алюминиевых головок цилиндров наиболее распространены такие технологии, как гравитационное литье и литье под низким давлением [10] (см. табл. 3). Гравитационное литье предусматривает плавное заполнение литейной формы расплавом под действием гравитации, а для обеспечения направленной кристаллизации сплава применяется холодильник в нижней части формы. Технология Rotocast, которая разработана и запатентована в Германии, предусматривает изготовление алюминиевых отливок

Таблица 3

Использование литейных технологий в европейской автомобильной промышленности [9]

Алюминиевый блок цилиндров двигателя			**Алюминиевые головки цилиндров**		
Технология литья	2000, факт	2006, оценка	Технология литья	2000, факт	2006, оценка
Литье под высоким давлением	**72**	**68**	**Гравитационное литье**	**79**	**72**
Форма как стержневая блок-система	11	17	Литье под низким давлением	14	15
Литье под низким давлением	**12**	**7**	**Литье по газифицируемым моделям**	**4**	**5**
Литье по газифицируемым моделям	1	6	Форма как стержневая блок-система	2	4
Гравитационное литье	**4**	**2**	**Rotocast**	**1**	**4**
Всего произведено, млн шт.	4,5	8,3	Всего произведено, млн шт.	16,5	18,8

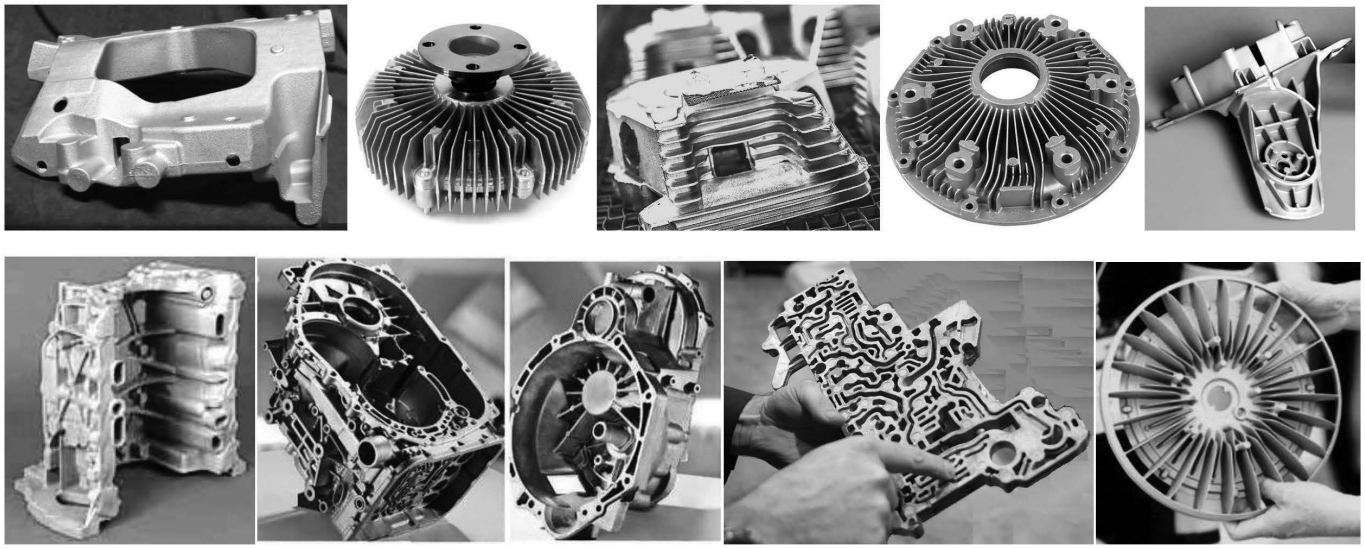
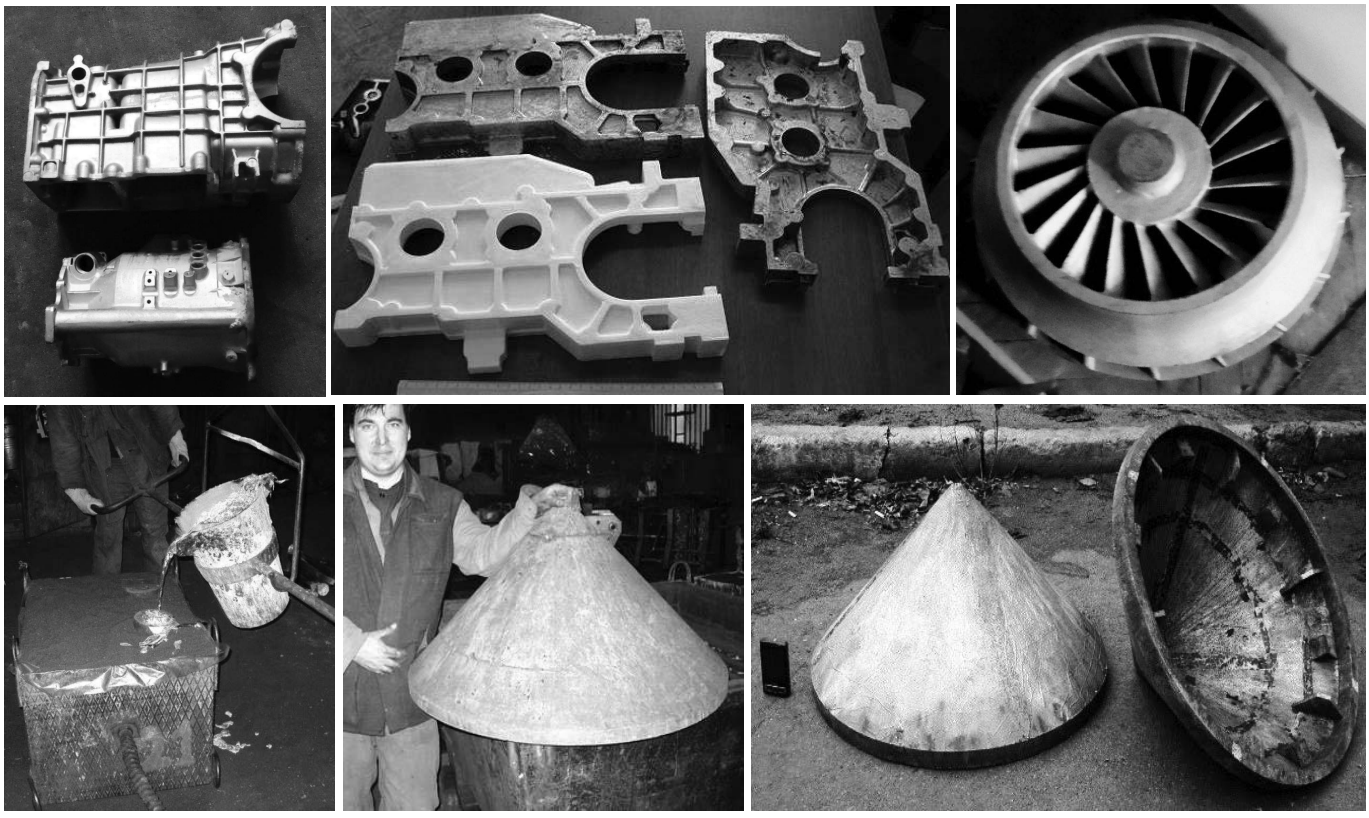


Рис. 4. Отливки из алюминиевых сплавов для моторостроения и другие корпусные детали, преимущественно полученные литьем под давлением, из фотогалерей зарубежных сайтов литейной тематики

в кокиль, который вращается вокруг горизонтальной оси. Также известно расширение технологи литья по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением [11]. Тенденцию опережающего роста выпуска отливок из алюминиевых сплавов в мире при некотором сокращении производства отливок из железоуглеродистых сплавов также подтверждает тематика исследований и инноваций в литейном производстве, в частности, Американской литейной ассоциации (American Foundry Society, AFS).

В завершение обзор информации о рынке литья из алюминиевых сплавов резонно дополнить примерами отливок (рис. 4) из фотогалерей на сайте AFS (www.afsinc.org), которые иллюстрируют растущие научно-технологические возможности, сложность отливок и профессиональный уровень литейщиков на сегодняшний день. Такие фото и видео традиционно представляет ряд зарубежных журналов и сайтов литейной тематики как профессиональные достижения той или иной компании, чьи отливки получили награды на конкурсах «отливка года» по виду металла, названию страны или области применения.

Поскольку значительную номенклатуру отливок из алюминиевых сплавов освоено Физико-технологическим институтом металлов и сплавов НАН Украины, то ее по теме этого обзора также уместно проиллюстрировать рядом примеров (рис. 5). Большинство таких отливок изготовлено по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс). Эту технологию успешно




EURACCO

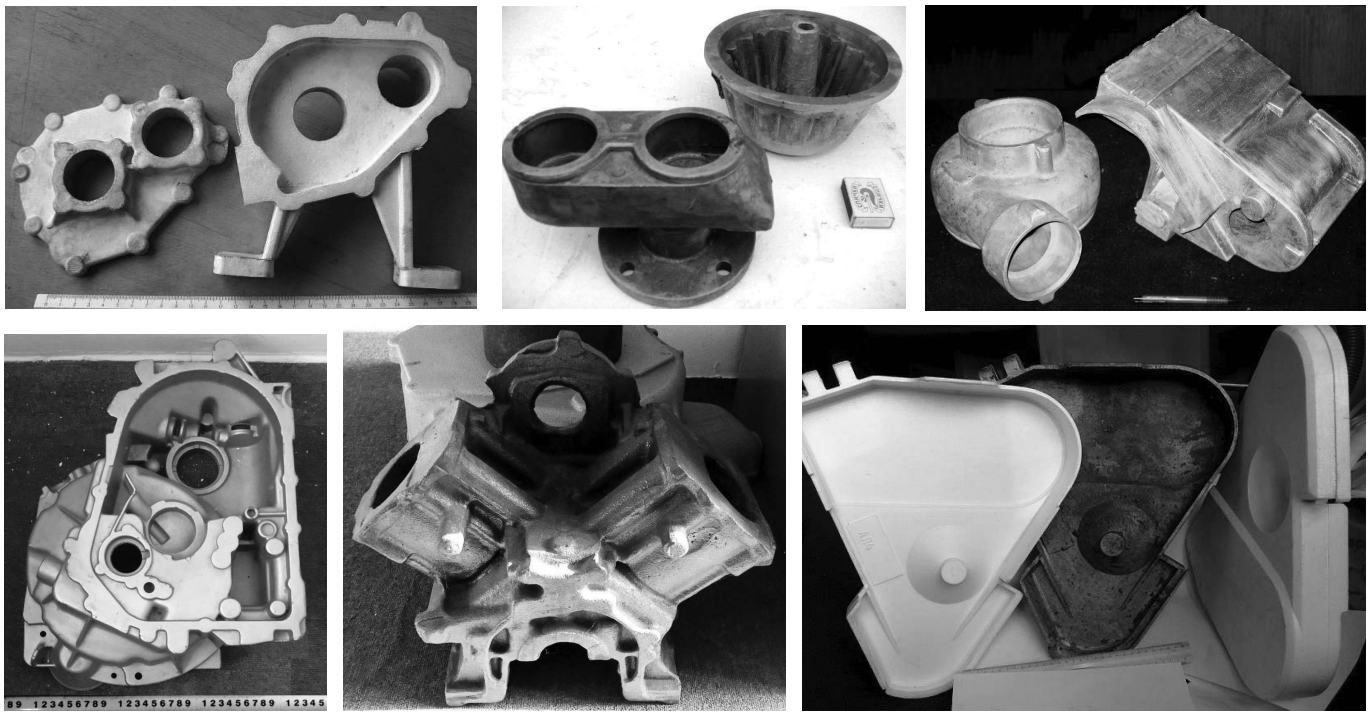


Рис. 5. Примеры отливок из алюминиевых сплавов, изготовленных с участием специалистов отдела физико-химии литейных процессов ФТИМС НАН Украины

развивает отдел физико-химии литейных процессов под руководством д.т.н., проф. О.И. Шинского.

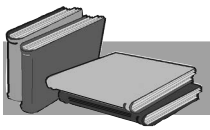
Выводы

Мировой рынок отливок из алюминиевых сплавов в начале XXI века характеризуется динамизмом и возрастающим трендом. Несмотря на локальный во времени экономический кризис, в период с 2000 по 2017 гг., производство алюминиевых отливок в мире увеличилось в 2,4 раза. Основным потребителем алюминиевых отливок является транспортная отрасль (доля 75 % в 2011 г.), в том числе автомобилестроение – 57 %. Странами лидерами по производству алюминиевых отливок являются Китай, США и Япония. Литейное производство автомобильной отрасли использует прогрессивные технологии, которые постоянно совершенствуются, о чем свидетельствуют приведенные примеры отливок. Ученые создают новые технологии и литейные сплавы с повышенными эксплуатационными характеристиками, как, например, технология Rotocast, сплавы системы Al-Ce-X и ряд способов литья под давлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. 48th Census of World Casting Production. *Modern Casting*, December 2014, pp. 17–21.
2. 52th Census of World Casting Production. *Modern Casting*, December 2018, pp. 23–26.
3. International Trade Centre. URL: http://www.intracen.org
4. The Global Market for Aluminium Castings to 2021. Prospectus. June 2012. 6 p. URL: www.metalbulletinresearch.com
5. The Aluminium Avtomotive manual. Products – Cast alloys and products. European Aluminium Association. 2002, 37 p. URL: https://www.european-aluminium.eu
6. *Sims Z.C.* et al. Cerium-Based, Intermetallic-Strengthened Aluminum Casting Alloy: High-Volume Co-product Development. JOM, 68 (2016). P. 1940–1947.
7. *Weiss D.* Development and Casting of High Cerium Content Aluminum Alloys. *Global Casting Magazine*. July 2018. Vol. 8, no. 2. P. 22–27.
8. Mineral commodity summaries 2019. US Geological Survey. 204 p. URL: https://usgs.gov
9. The Aluminium Avtomotive manual. Manufacturing – Casting methods. European Aluminium Association. 2002, 82 p. URL: https://www.european-aluminium.eu
10. *Дорошенко В.С., Шейко Н.И.* Литье под низким давлением крупногабаритных гидроплотных деталей. *Литейное производство.* 1990. № 6. С. 13–14.
11. *Дорошенко В.С.* Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением. *Литейное производство.* 2016. № 1. С. 25–28.

Поступила 20.03.2019



REFERENCES

1. 48th Census of World Casting Production. *Modern Casting*, December 2014, pp. 17–21 [in English].
2. 52th Census of World Casting Production. *Modern Casting*, December 2018, pp. 23–26 [in English].
3. International Trade Centre. URL: http://www.intracen.org [in English].
4. The Global Market for Aluminium Castings to 2021. Prospectus. June 2012. 6 p. URL: www.metalbulletinresearch.com [in English].
5. The Aluminium Avtomotive manual. Products – Cast alloys and products. European Aluminium Association. 2002, 37 p. URL: https://www.european-aluminium.eu [in English].
6. *Sims, Z.C.* et al. (2016). Cerium-Based, Intermetallic-Strengthened Aluminum Casting Alloy: High-Volume Co-product Development. JOM, 68 (2016), pp. 1940–1947 [in English].
7. *Weiss, D.* (2018). Development and Casting of High Cerium Content Aluminum Alloys. *Global Casting Magazine.* July 2018. Vol. 8, no. 2, pp. 22–27 [in English].
8. Mineral commodity summaries 2019. US Geological Survey. 204 p. URL: https://usgs.gov [in English].
9. The Aluminium Avtomotive manual. Manufacturing – Casting methods. European Aluminium Association. 2002, 82 p. URL: https://www.european-aluminium.eu [in English].
10. *Doroshenko, V.S., Shejko, N.I.* (1990). Low pressure casting of large-sized hydrolit parts. *Liteinoe proizvodstvo,* no. 6, pp. 13–14 [in Russian].
11. *Doroshenko, V.S.* (2016). Casting on gasified patterns with crystallization of metal under pressure. *Liteinoe proizvodstvo*, no. 1, pp. 25–28 [in Russian].

Received 20.03.2019

Анотація

В.А. Гнатуш, канд. техн. наук, незалежний аналітик, e-mail: vgnatus@gmail.com; **В.С. Дорошенко**[1], д-р техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: doro55v@gmail.com

[1]*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна*

Зростання виробництва алюмінієвого лиття на початку XXI століття

Представлено аналіз світового ринку алюмінієвих виливків в 2000–2017 рр., а також поточні тенденції у виробництві, торгівлі, ливарних технологіях і ливарних сплавах. Світовий ринок виливків з алюмінієвих сплавів на початку XXI століття характеризується динамізмом і зростаючим трендом. Незважаючи на локальну у часі економічну кризу, в період з 2000 по 2017 рр., виробництво алюмінієвих виливків в світі збільшилося в 2,4 рази. Основним споживачем таких виливків є транспортна галузь (частка 75 % у 2011 р.), в тому числі автомобілебудування – 57 %. Країнами лідерами з виробництва алюмінієвих виливків є Китай, США та Японія. Ливарне виробництво автомобільної галузі використовує прогресивні технології, які постійно вдосконалюються, про що свідчать наведені приклади виливків. Вчені створюють нові технології і ливарні сплави з підвищеними експлуатаційними характеристиками, як, наприклад, технологія Rotocast, сплави системи Al-Ce-X. Відомо розширення технології лиття за моделями, що газифікуються, з кристалізацією металу під тиском. Випереджаюче зростання випуску виливків з алюмінієвих сплавів в світі при деякому скороченні виробництва виливків із залізовуглецевих сплавів також підтверджує тематика досліджень та інновацій в ливарному виробництві, зокрема, Американської ливарної асоціації. Наведено приклади складних за конструкцією виливків з алюмінієвих сплавів для моторобудування і інші корпусні деталі, переважно отримані литтям під тиском. Значну номенклатуру виливків з алюмінієвих сплавів освоєно Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України. Більшість таких виливків з алюмінієвих сплавів виготовлено за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Цю технологію успішно розвиває відділ під керівництвом проф. О.Й. Шинського.

Ключові слова *Ринок, виливки, алюміній, тенденції, виробництво, технології, сплави.*

V.A. Gnatush, Candidate of Engineering Sciences, Independent Analyst, e-mail: vgnatus@gmail.com; **V.S. Doroshenko**[1], Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: doro55v@gmail.com

[1]Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The growth of aluminum casting production at the beginning of the XXI century

Summary

The analysis of the global market for aluminum castings in 2000–2017, as well as current trends in production, trade, foundry technologies and foundry alloys are presented. The global market for aluminum alloy castings at the beginning of the XXI century is characterized by dynamism and an increasing trend. Despite the local economic crisis in time, in the period from 2000 to 2017, the production of aluminum castings in the world increased by 2.4 times. The main consumer of such castings is the transport industry (75 % share in 2011), including the automotive industry – 57 %. The countries leading in the production of aluminum castings are China, USA and Japan. Foundry automotive industry uses advanced technologies that are constantly being improved, as evidenced by the examples of castings. Scientists are creating new technologies and foundry alloys with enhanced performance characteristics, such as, for example, Rotocast technology, alloys of the Al-Ce-X system. The expansion of casting technology – Lost Foam casting process with the crystallization of the metal under pressure is known. The outpacing growth in the production of castings from aluminum alloys in the world, with some reduction in the production of castings from iron-carbon alloys, is also confirmed by the topics of research and innovation in the foundry industry, in particular, by the American Foundry Association. Examples are shown of complex construction of aluminum alloy castings for engine building and other body parts, mainly obtained by casting under pressure. A significant range of castings of aluminum alloys has been mastered by Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine. Most of these aluminum alloy castings are manufactured according to Lost Foam casting process (LFC process). This technology is successfully developed by the department under the guidance of prof. O.I. Shinsky.

Keywords

Market, castings, aluminum, trends, production, technologies, alloys.

УДК 621.74

И.В. Лукьяненко, ассистент, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1043-9688, ResearcherID: J-7294-2017

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Исследование технологических параметров процесса получения чугунных отливок для работы в условиях износа

В работе дано подробное описание состояния вопроса, который касается актуальности повышения износостойкости деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного абразивного и ударно-абразивного износа. Изложены основные актуальные направления решения этой проблемы. Высветлены преимущества использования биметаллов в мировой и отечественной практике, а также приведены основные группы методов, которые характеризуются общностью технологических приемов, производства биметаллов и многослойных материалов с использованием технологий литья. Подробно рассмотрен способ получения отливки с разными структурой и свойствами в разных ее частях из расплава чугуна одного химического состава для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Основываясь на данном способе, проведены исследования технологических факторов, которые влияют на получения чугунных отливок с дифференцированными свойствами, а именно временного интервала между этапами заливки литейной формы. Исходя из результатов первичного эксперимента, был применен метод компьютерного моделирования процессов заливки и кристаллизации расплава, который, после дополнительной математической обработки, позволил определить вероятные границы временного интервала выдержки между заливками. В результате проведения дальнейших экспериментов подтверждены результаты компьютерного моделирования и определены оптимальные временные рамки исследуемого интервала выдержки. Также в работе приведены данные по структурным составляющим, которые образовались в разных частях отливки, в том числе и переходной зоне между слоем высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и белого чугуна. Получены данные касаемо твердости рабочего слоя отливки и слоя основы, а также установлены размеры переходного слоя, который образовывается при использовании исследуемой технологии производства.

Ключевые слова: *абразивный износ, белый чугун, высокопрочный чугун с шаровидным графитом, внутриформенное модифицирование, двухслойная чугунная отливка, дифференцированные свойства, литье в песчано-глинистые формы, переходная зона, реакционная камера, ударно-абразивный износ.*

В мировой и отечественной промышленности остро стоит вопрос повышения износостойкости деталей машин и механизмов. По данным источника [1], при добыче и обогащении руды, угля, цементного сырья, камня и т. п. из-за абразивного износа расходуются сотни тысяч тонн металла. На примере США ориентировочные годовые затраты на производство износостойких отливок составляют 2,8 млрд долл. при их производстве свыше 280 тыс. т в год [1].

Неотъемлемой частью процесса эксплуатации многих деталей машин и механизмов является износ. В определенных случаях, связанных с конкретными условиями эксплуатации таких деталей, интенсивность износа чрезвычайно высока [2]. Абразивному и ударно-абразивному износу подвергается большая группа машин и оборудования, задействованных в добыче, перемещении и переработке минерального сырья, например, дробление гранита, базальта и т. д. К такому оборудованию относят: бульдозеры, драглайны, дробилки, мельницы, отбойные плиты, бункера и др. [1, 2].

Снижение долговечности, надежности, а также ухудшение экономической эффективности от эксплуатации машин и механизмов вместе с наличием безвозвратных потерь металла обусловлено использованием деталей с недостаточной износостойкостью для работы в тех или иных условиях эксплуатации. Однако, одновременно с этим, в различных отраслях промышленности постоянно возрастает спрос на продукты переработки минерального сырья. Так, по данным авторов [2], для строительства современных автомобильных дорог и скоростных железнодорожных линий по новым технологиям ежегодно требуется более 6 млн т кубовидного щебня.

Таким образом, по мнению авторов [2], проблема повышения износостойкости материалов, увеличения технического ресурса деталей машин и оборудо-

вания, работающих в условиях активного износа при значительных нагрузках, сокращения безвозвратных потерь металла, снижения расхода высоколегированных дорогостоящих сплавов является одной из наиболее актуальных в Украине и мире на сегодняшний день. Перспективным вариантом решения обозначенной проблемы, по мнению авторов [3, 4], является использование такого класса материалов как биметаллы, важнейшей особенностью изделий из которых является сочетание в себе уникального комплекса свойств. Обеспечение оптимального сочетания свойств и их дифференциации по сечению отливок позволяют использовать их в тех отраслях промышленности, в которых условия работы связаны, в том числе, с интенсивным износом, таких как горнорудное производство, металлургия, цементная и нефтехимическая промышленность, машиностроение, строительство, сельское хозяйство, энергетика и др. [2].

По данным авторов [5], использование биметаллических отливок в качестве деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного абразивного, ударно-абразивного и гидроабразивного износа, позволяет повысить в 2,5–6,0 раз эксплуатационный ресурс работы этих деталей, а также снизить применение высоколегированных дорогостоящих сплавов и остродефицитных компонентов до 70 %.

Среди существующих методов получения износостойких биметаллических и многослойных отливок, которые характеризуются общностью технологических приемов, авторы работы [5] выделяют основные четыре группы:

– заливка жидкого металла на твердую заготовку, расположенную в литейной форме;

– последовательная заливка расплавов в форму через автономные литниковые системы;

– последовательная заливка расплавов в изложницу центробежной машины;

– одновременная заливка расплавов в форму с разделительными перегородками.

Однако вышеуказанные методы получения биметаллических и многослойных отливок предполагают использование двух различных расплавов, что приводит к усложнению технологического процесса их производства и, как следствие, к удорожанию готовой продукции. В тоже время, условия работы таких отливок позволяют применять в их рабочем слое белые чугуны различных типов, в структуре которых присутствуют карбиды, благодаря которым износостойкость чугунов, по данным работы [1], в 5–10 раз выше, чем у конструкционных сталей. Остальную часть отливки нецелесообразно выполнять из такого материала, поскольку высокая его твердость, из-за наличия карбидов в структуре, приводит к ухудшению его обрабатываемости или вовсе к невозможности механической обработки в текущих условиях производства. Поскольку кристаллизационные процессы в чугуне довольно разнообразны, в зависимости от определенных условий, то возможно обеспечить кристаллизацию чугуна по стабильной системе с образованием в структуре включений графита той или иной формы и отсутствии твердых карбидных включений.

На основе метода получения многослойных отливок последовательной заливкой расплавов в форму через автономные литниковые системы исследователями [6, 7, 8] был разработан и предложен метод получения чугунных отливок из расплава чугуна одного химического состава модифицированием его в литейной форме. Данный метод позволяет получать чугунные отливки для работы в условиях абразивного или ударно-абразивного износа с рабочим слоем из белого чугуна с твердыми карбидными включениями. Сущность процесса заключается в поэтапной заливке литейной формы чугуном одного химического состава через независимые литниковые системы, в состав одной из которых входит реакционная камера с измельченным модификатором для проведения внутриформенного модифицирования чугуна, что в свою очередь позволяет обеспечить дифференциацию свойств в отливке [9].

Целью данной работы была разработка технологических параметров процесса получения двухслойных чугунных отливок с дифференцированными свойствами для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Кристаллизацию первой порции расплава необходимо провести по метастабильной системе, что позволит сформировать рабочий износостойкий слой отливки. Во втором слое отливки необходимо обеспечить кристаллизацию чугуна с графитом шаровидной формы, что обеспечивает возможность работы отливки в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, для этого необходимо произвести внутриформенную обработку расплава сфероидизирующим модификатором с образованием графита шаровидной формы. Основными условиями получения таких отливок является обеспечение невозможности перемешивания чугунов после второго этапа заливки и обеспечения бездефектности переходного слоя.

Для проведения исследований объектом выбрано отливку размерами 240×120×50 мм. Подведение расплава в полость формы осуществляли через две независимые литниковые системы. Первый этап заливки проводили через первую литниковую систему, проходя по которой порция расплава непосредственно попадала в полость формы. На втором этапе по второй литниковой системе расплав попадал в реакционную камеру со сфероидизирующим модификатором, в качестве которого был выбран ферросиликомагниевый модификатор ФСМг7, и после модифицирования дозаполнял оставшуюся часть полости литейной формы (рис. 1). В качестве исходного материала для проведения исследований был выбран чугун с углеродным эквивалентом на уровне от 3,1 до 3,2 %, кристаллизация которого в условиях заливки в сухую песчано-глинистую форму проходит по метастабильной системе [10].

Экспресс-оценку результатов эксперимента проводили визуальным методом по виду макроструктуры излома в верхней и нижней части чугунной отливки в ее центральном сечении. Дополнительную информа-

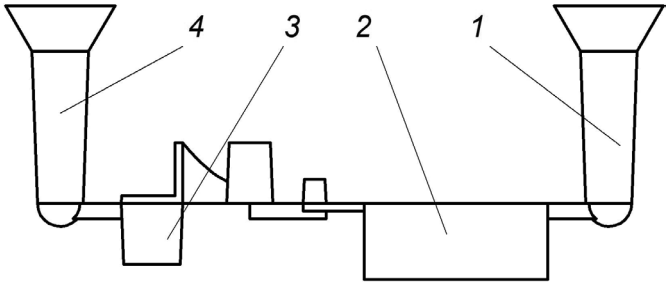


Рис. 1. Схема отливки з литниковыми системами: *1* – первая литниковая система; *2* – отливка; *3* – реакционная камера во второй литниковой системе; *4* – вторая литниковая система

цию получали, используя металлографический анализ и определяя твердость разных слоев образцов.

Авторами [11] отмечается, что при получении биметаллической отливки по схожей технологии доливка второго слоя происходит в то время, когда поверхность первого слой находится в жидком или жидко-твердом состоянии, то есть интервал между последовательными заливками сводится к минимуму.

По результатам исследований установлено, что при минимальном интервале выдержки в несколько секунд между этапами заливки расплава дифференциация структуры в отливке не наблюдается, а отливка кристаллизуется с однородной структурой серого чугуна с пластинчатым графитом.

Для ориентировочного определения временного интервала выдержки между последовательными заливками расплава использовали метод компьютерного моделирования (рис. 2). В качестве объектов исследования построены модели длиной и шириной 100×100 мм. Высоту моделей варьировали в диапазоне от 5 до 50 мм с шагом в 5 мм, что моделирует толщины стенок мелких чугунных отливок, используемых промышленностью. В центре масс каждой модели было установлено датчик, который в режиме реального времени фиксировал значение температуры моделируемого расплава. Для набора дополнительных данных по времени кристаллизации температуры заливки расплава для проведения компьютерного моделирования изменяли от 1300 до 1500 °С с шагом 50 °С.

По результатам проведенного моделирования были записаны кривые охлаждения расплава в центре масс каждой из модели. После математической обработки полученных данных были построены зависимости времени кристаллизации расплава от толщины стенки моделей при различных температурах заливки (рис. 3). По полученным результатам установлено, что при температуре заливки 1300 °С первого слоя отливки толщиной 25 мм, время его кристаллизации составляет около 100 с. Из этого следует, что при такой выдержке между заливками гарантированно не произойдет гидродинамическое перемешивание чугунов внутри литейной формы, отсутствие которого является важным условием получения отливки с дифференцированными свойствами. Таким же образом время кристаллизации можно определить и для случаев с более высокими температурами заливки в исследуемом диапазоне толщин стенок. Для проверки полученных результатов и проведения дальнейших экспериментов установлены временные интервалы между этапами заливки на уровне 30, 60, 90 и 120 с.

В результате проведенных экспериментов установлено, что дифференциация структуры и свойств в отливке обеспечивается при интервале между последовательными заливками на уровне 60 с и выше. При выдержке между этапами заливки 120 с на поверхности залитой первой порции расплава образуется оксидная пленка, которая приводит к частичному расслоению отливки в месте соединения слоев после выбивки формы. Также излучение тепла открытой поверхностью расплава способствует потере прочности формовочной смеси, расположенной над расплавом, ее отслоению и осыпанию на зеркало, что приводит к образованию дефектов в виде песчаных раковин между слоями чугунов при различном интервале выдержки. Однако предотвратить осы-

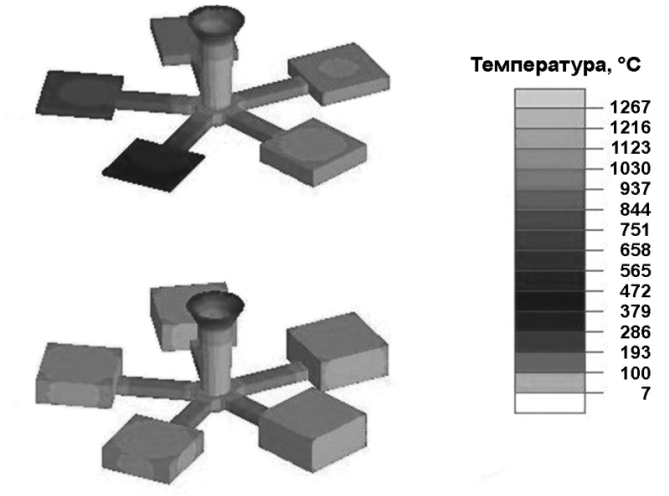


Рис. 2. Схема моделирования процесса заливки и кристаллизации чугуна

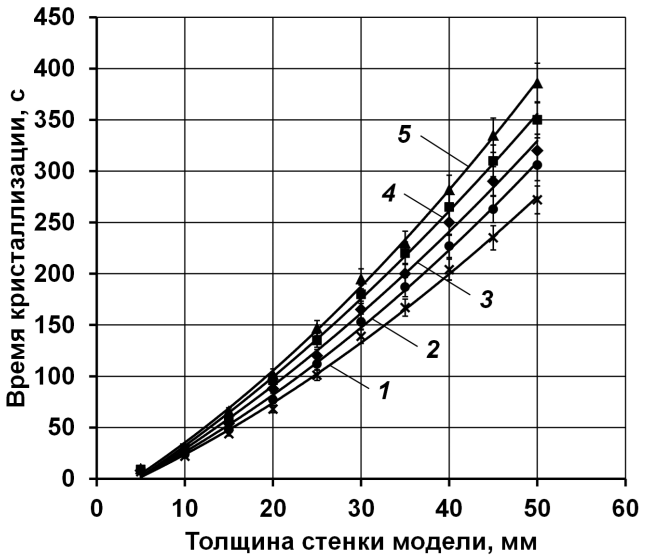


Рис. 3. Влияние толщины стенки модели на время кристаллизации при различных температурах заливки: *1* – 1300 °С; *2* – 1350 °С; *3* – 1400 °С; *4* – 1450 °С; *5* – 1500 °С

пания формовочной смеси можно, используя такие технологические приемы, как окрашивание рабочей полости верхней полуформы, использование облицовочных смесей повышенной прочности, применение добавок, повышающих прочность формовочной смеси, и т. д., что положительно сказывается на получении качественного соединения слоев в отливках с интервалом выдержки между последовательными заливками до 120 с.

По виду макроструктуры излома в верхней и нижней части отливки установлено, что равномерные по толщине слои белого и высокопрочного чугуна с бездефектной переходной зоной обеспечивает выдержка между этапами последовательной заливки на уровне 60–90 с. В микроструктуре нижней части отливки, кристаллизация чугуна в которой происходила по метастабильной системе, наблюдаются включения твердых составляющих, таких как структурно свободный цементит и ледебуритная эвтектика, которые равномерно распределены в перлитной металлической матрице. Переходная зона между слоями объединяла дендриты цементита, включение ледебуритной эвтектики и включения графита шаровидной формы в перлитной металлической матрице. В микроструктуре верхнего слоя наблюдались включения графита шаровидной формы в ферритной оторочке в перлитоферритной металлической матрице (рис. 4).

Дифференциация структуры по сечению отливки подтверждается изменением твердости. Установлено, что при получении отливок с сочетанием слоев белого и высокопрочного чугуна, разница твердости между верхней и нижней плоскостями отливки находиться на уровне 230–280 НВ. При этом твердость поверхности высокопрочного слоя отливки в литом состоянии составляет 210–218 НВ, а твердость поверхности слоя белого чугуна – 447-480 НВ. Следует отметить, что при времени выдержки между этапами заливки 30 с, разница в твердости различных слоев отливки практически отсутствует вследствие их перемешивания в литейной форме (рис. 5), а с учетом возможности образования дефектов в переходной зоне и, как следствие, расслоению отливки, выдержка 120 с и более нецелесообразна даже при положительных результатах дифференциации структуры в разных ее слоях.

Установлено, что в полученных по такой технологии двухслойных чугунных отливках из белого и высокопрочного чугуна, размер переходной зоны по плоскости контакта между слоями находится в диапазоне от 690 до 875 мкм (рис. 6). При этом сама переходная зона характеризуется отсутствием каких-либо дефектов, связанных с образованием пор и раковин, а также оксидных включений, которые возможны в отливках, полученных по схожим технологиям, что позволяет обеспечить качественное

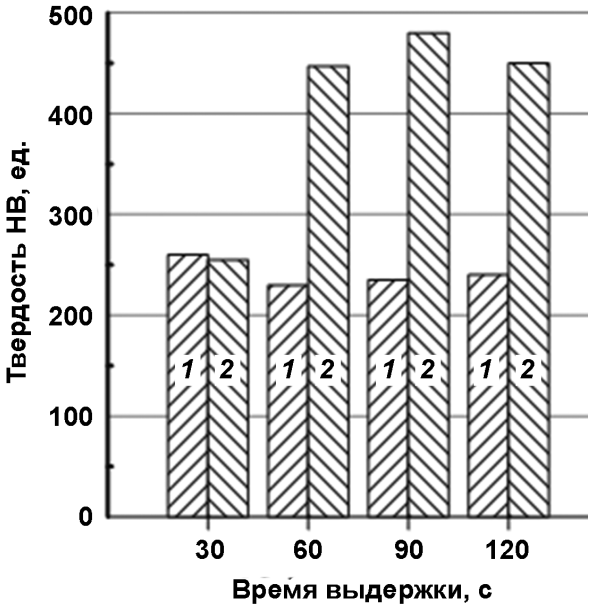


Рис. 5. Влияние времени выдержки между этапами последовательной заливки на твердость слоев отливки: *1* – слой высокопрочного чугуна; *2* – слой белого чугуна

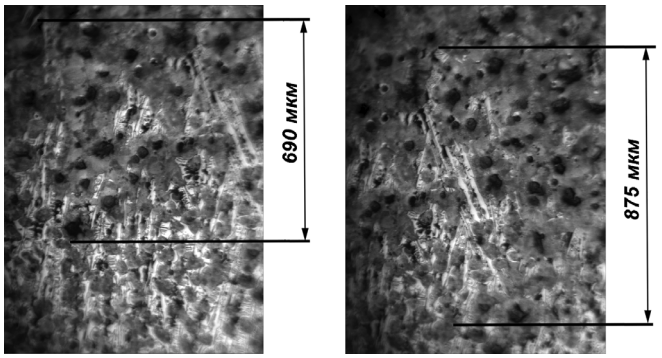
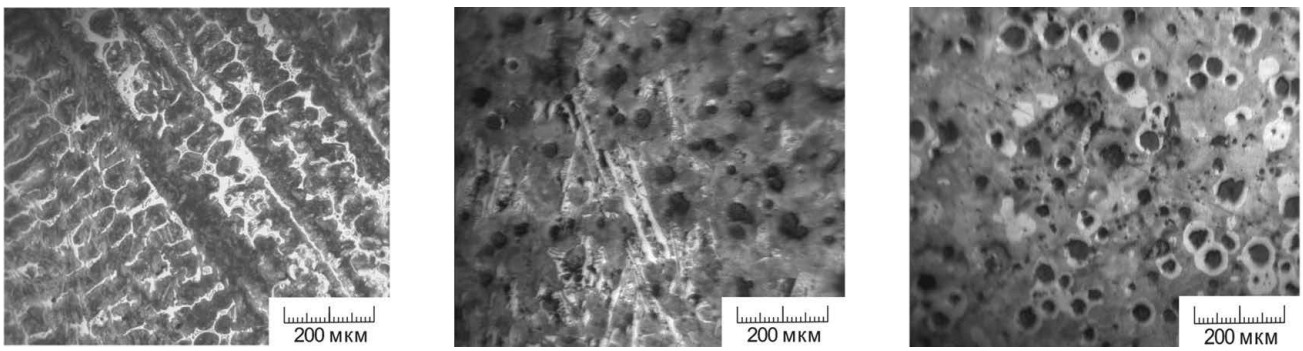


Рис. 6. Микроструктура переходной зоны двухслойной чугунной отливки



а *б* *в*

Рис. 4. Микроструктуры в различных частях отливки: *а* – нижний слой; *б* – переходная зона; *в* – верхний слой

соединение слоев и надежную работу отливки в условиях износа.

Выводы

Результаты компьютерного моделирования полностью подтверждаются результатами исследований и доказывают целесообразность разработанной технологии получения чугунных отливок с дифференцированными свойствами для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Установлено, что возможность дифференциации в отливке обеспечивается условиями не смешивания чугунов, поочередно залитых в литейную форму, что обеспечивается кристаллизацией первого слоя отливки достаточной толщины за определенное время. С помощью моделирования определены временные рамки между этапами заливки и проведены эксперименты, в результате которых получены отливки с дифференцированными свойствами. Также, в результате проведенных экспериментов, даны рекомендации касательно технологии литейной формы, которые минимизируют возможный брак по ее вине. Установлено, что исследуемая технология позволяет получить переходную зону между слоем белого чугуна и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом размером до 1 мм, в состав которой входят включения цементита, ледебурита и шаровидного графита в перлитной металлической матрице.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гарбер М.Е.* Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация. М.: Машиностроение, 2010. 280 с.
2. *Каричковский П.Н., Шинский И.О., Клименко Л.М.* Способы повышения технического ресурса, эксплуатационной надежности рабочих органов дробильно-размольного оборудования. *Металл и литье Украины*. 2009. № 7–8. С. 56–60.
3. *Костенко Г.Д., Пеликан О.А., Болгар С.А., Костенко Д.Г.* Износостойкие биметаллические отливки на основе сплавов железа. *Металл и литье Украины.* 1998. № 9–10. С. 30–33.
4. *Костенко Г.Д., Диюк Л.М., Костенко Д.Г., Пеликан О.А., Болгар С.А., Клименко Л.М.* Исследование физико-химических процессов при формировании биметаллических отливок на основе железоуглеродистых сплавов. *Процессы литья.* 2006. № 3. С. 37–41.
5. *Ширяев В.В., Пеликан О.А., Шинский И.О., Глушков Д.В., Романенко Ю.Н.* Технологические особенности производства биметаллических (многослойных) отливок повышенной износостойкости. *Металл и литье Украины*. 2009. № 7–8. С. 52–56.
6. *Фесенко М.А., Фесенко А.Н.* Перспективные направления использования метода внутриформенного модифицирования расплава для изготовления отливок с заданными эксплуатационными свойствами. *Литье и металлургия.* 2013. № 4(73). С. 35–41.
7. *Фесенко М.А.* Новые технологии изготовления отливок модифицированием чугуна в литейной форме. *Металл и литье Украины.* 2014. № 11. С. 10–16.
8. Пат. № 41383 U200811908, B22 D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / А.М. Фесенко, М.А. Фесенко, В.О. Косячков, К.В. Ємельяненко; заявл. 07.10.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10, 2009.
9. *Фесенко М.А., Фесенко А.Н., Косячков В.А.* Внутриформенное модифицирование для получения чугунных отливок с дифференцированными структурой и свойствами. *Литейное производство.* 2010. № 1. С. 7–12.
10. Пат. № 27681 U200707328, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованами властивостями / Фесенко М.А., Косячков В.О. Фесенко А.М; заявл. 02.07.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18, 2007.
11. *Yong-chang Zhu, Zun-jie Wei, Shou-fan Rong, Hong-wei Wang, Chun-ming Zou.* Formation mechanism of bimetal composite layer between LCS and HCCI. *China foundry.* 2016. Vol. 13, № 6. P. 396–401.

Поступила 04.04.2019

REFERENCES

1. *Garber, M.E.* (2010). Wear-resistant white cast irons: properties, structure, technology, operation. Moscow: Mashinostroenie, 280 p. [in Russian].
2. *Karychkovsky, P.N., Shynsky, I.O., Klymenko, L.M.* (2009). Methods of increasing of the technical resource, operation reliability of the working parts of crushing-and-milling equipment. *Metall i lit'e Ukrainy,* no. 7–8, pp. 56–60 [in Russian].
3. *Kostenko, G.D., Pelikan, O.A., Kostenko, D.G.* (1998). Wear-resistant bimetallic castings based on iron alloys. *Metall i lit'e Ukrainy,* no. 9–10, pp. 30–33 [in Russian].
4. *Kostenko, G.D., Diuk, L.M., Kostenko, D.G., Pelikan, O.A., Bolgar, S.A., Klimenko, L.M.* (2006). Study of physico-chemical processes in the formation of bimetallic castings based on iron-carbon alloys, *Casting processes,* no. 3, pp. 37–41 [in Russian].
5. *Shiryaev, V.V., Pelikan, O.A., Shynsky, I.O., Glushkov, D.V., Romanenko, Yu. N.* (2009). Technological peculiarities of the bimetallic (multi-layer) castings production of high wear resistance. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7–8, pp. 52–56 [in Russian].

6. *Fesenko, M.A., Fesenko, A.N.* (2013). Promising areas of use of the method of in-mold modification of the melt for the manufacture of castings with specified operating properties. *Lit'e i metallurgiya*. *Casting and metallurgy*, no. 4(73), pp. 35–41 [in Russian].
7. *Fesenko M.A.* (2014). New technologies for production of castings by in-mold inoculation. *Metall i lit'e Ukrainy,* no. 11, pp. 10–16 [in Russian].
8. *Fesenko, A.M., Fesenko, M.A., Kosiachkov, V.O., Yemelianenko, K.V.* (2009). Patent no. 41383 U200811908, V22 D27/00. Method of making castings with differentiated structure and properties. Zaiavl. 07.10.2008, opubl. 25.05.2009, Biul. no. 10 [in Ukrainian].
9. *Fesenko, M.A., Fesenko, A.N., Kosiachkov, V.A.* (2010). In-mold modification for the production of cast iron castings with differentiated structure and properties. *Liteinoe proizvodstvo,* no. 1, pp. 7–12 [in Russian].
10. *Fesenko, M.A., Kosiachkov, V.O., Fesenko, A.M.* (2007). Patent no. 27681 U200707328, B22D27/00. Method of making castings with differentiated properties. Zaiavl. 02.07.2007, opubl. 12.11.2007, Biul. no. 18 [in Ukrainian].
11. *Yong-chang Zhu, Zun-jie Wei, Shou-fan Rong, Hong-wei Wang & Chun-ming Zou* (2016). Formation mechanism of bimetal composite layer between LCS and HCCI. *China foundry*, Vol. 13, no. 6, pp. 396–401 [in English].

Received 04.04.2019

Анотація

І.В. Лук'яненко, асистент, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1043-9688, ResearcherID: J-7294-2017

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Дослідження технологічних параметрів процесу отримання чавунних виливків для роботи в умовах зношування

У роботі дано детальний опис стану питання щодо актуальності підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів, які працюють в умовах інтенсивного абразивного і ударно-абразивного зношування. Викладено основні актуальні напрямки вирішення цієї проблеми. Висвітлено переваги використання біметалів у світовій і вітчизняній практиці, а також наведено основні групи методів, які характеризуються спільністю технологічних прийомів, виробництва біметалів і багатошарових матеріалів з використанням ливарних технологій. Детально розглянуто спосіб отримання виливка з різними структурою і властивостями в різних його частинах з розплаву чавуну одного хімічного складу для роботи в умовах абразивного і ударно-абразивного зношування. Ґрунтуючись на даному способі, проведено дослідження технологічних факторів, які впливають на отримання чавунних виливків з диференційованими властивостями, а саме тимчасового інтервалу між етапами заливання ливарної форми. Виходячи з результатів первинного експерименту, було застосовано метод комп'ютерного моделювання процесів заливання і кристалізації розплаву, який, після додаткової математичної обробки, дозволив визначити ймовірні межі тимчасового інтервалу витримки між заливаннями. В результаті проведення подальших експериментів підтверджено результати комп'ютерного моделювання та визначено оптимальні тимчасові рамки досліджуваного інтервалу витримки. Також в роботі наведено дані щодо структурних складових, які утворилися в різних частинах виливка, в тому числі в перехідній зоні між шаром високоміцного чавуну з кулястим графітом і білого чавуну. Отримано дані стосовно твердості робочого шару виливка і шару основи, а також встановлено розміри перехідного шару, який утворюється при використанні досліджуваної технології виробництва.

Ключові слова

Абразивне зношування, білий чавун, високоміцний чавун з кулястим графітом, внутрішньоформове модифікування, двошаровий чавунний виливок, диференційовані властивості, лиття в піщано-глинисті форми, перехідна зона, реакційна камера, ударно-абразивне зношування.

I.V. Lukianenko, assistant, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1043-9688, ResearcherID: J-7294-2017

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Research of technological parameters of the process of iron castings obtaining for work in wearing conditions

Summary

The paper provides a detailed description of the state of the issue, which concerns the relevance of improving the wear resistance of machine and mechanisms parts operating under conditions of intense abrasive and impact-abrasive wear. The basic actual directions of the solution of this problem are stated. The advantages of using bimetals in the global and domestic practice are highlighted, and the main groups of methods that are characterized by common technological methods, production of bimetals and multilayer materials using casting technologies are given. Considered in detail the method of producing castings with different structures and properties in different parts of it from a cast iron melt of the same chemical composition for work under conditions of abrasive and impact-abrasive wear. Based on this method, studies of technological factors that affect the production of iron castings with differentiated properties, namely the time interval between the steps of pouring the mold, have been carried out. Based on the results of the primary experiment, a method of computer simulation of the processes of melt pouring and crystallization was applied, which, after additional mathematical processing, made it possible to determine the probable limits of the exposure time interval between the pouring. As a result of further experiments, the results of computer simulation were confirmed and the optimal time frames of the exposure interval under study were determined. The paper also presents data on structural components that were formed in different parts of the casting, including the transition zone between a layer of ductile cast iron and white cast iron. Data were obtained regarding the hardness of the working layer of the casting and the base layer, as well as the dimensions of the transition layer, which is formed when using the production technology under investigation, are established.

Keywords

Abrasive wear, white cast iron, ductile cast iron, in-mold modification, two-layer cast iron casting, differentiated properties, sand-clay mold casting, transition zone, reaction chamber, impact-abrasive wear.

УДК 621.771.001

Я.Д. Василев, д-р техн. наук, профессор

Р.А. Замогильный, мл. науч. сотр., e-mail: rz90@i.ua

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), Днепр, Украина

Влияние особенностей контактного взаимодействия тонкой полосы с валками на параметры начальной настройки рабочей клети и наименьшую толщину прокатываемой полосы

Исследованы особенности силового взаимодействия тонкой полосы с валками и с рабочей клетью в целом при холодной прокатке. Показано, что при холодной прокатке тонких полос, упругие деформации валков и полосы оказывают решающее влияние на погонную силу прокатки P_c/b. Представлены данные, подтверждающие, что формирование толщины полосы при прокатке происходит в результате совместного взаимодействия последней с рабочими валками и с рабочей клетью в целом.

Из-за низких значений модуля жесткости рабочих клетей $M_{кл}$ ($M_{кл}$ = 4,5–7,5 МН/мм) действующих станов холодной прокатки упругие деформации последних $\delta_{кл}$ многократно превышают толщину полосы на выходе из очага деформации h_1 ($\delta_{кл} >> h_1$), и процесс прокатки реализуется всегда в предварительно прижатых валках с силой $P_{пр}$, что ограничивает возможности оборудования для прокатки полос малой толщины. С уменьшением толщины и ширины полосы b вследствие уменьшения параметра b/L (где L – длина бочки валков), концевые участки бочек рабочих валков в процессе прокатки также находятся в «забое», то есть прижаты силой $P_з$, которая суммируется с силой прокатки P_c, что приводит к дополнительной нагрузке валков и, как следствие, к дополнительному ограничению возможностей оборудования для прокатки полос меньшей толщины.

Впервые решена задача по определению параметров начальной настройки рабочей клети при прокатке, когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки, и предложено решение для определения наименьшей толщины полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане. Экспериментальная проверка расчетного определения параметров начальной настройки и наименьшей толщины полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане $h_{1нм}$, подтвердила работоспособность и достаточную точность предложенных решений, что дает основание рекомендовать их для практического применения при расширении сортамента выпускаемой продукции на действующих станах, в сторону уменьшения толщины прокатываемых полос и при проектировании сортамента на новых станах для прокатки тонких и особо тонких полос, в том числе жести и фольги.

Ключевые слова: *холодная прокатка, стан, нажимное приспособление, сила, упругая деформация, взаимодействие, полоса, толщина.*

Введение. Холоднокатаный прокат является одним из наиболее востребованных видов металлопродукции. По данным работ [1, 2], потребление плоского холоднокатаного проката и жести в мире в настоящее время оценивается на уровне 130 млн т в год и продолжает расти. При этом наибольшим спросом пользуется холоднокатаный прокат толщиной 0,8–1,2 мм и менее средней ширины (до 1400 мм), доля которого составляет 71 % [1]. Поэтому основной тенденцией развития производства холоднокатаного проката является освоение и увеличение выпуска профилей тоньше 0,8 мм, вплоть до 0,25–0,35 мм, а также тонкой и особо тонкой жести толщиной 0,12–0,16 мм и улучшение качества выпускаемой продукции.

Актуальный уровень технологии и исследований. Для производства холоднокатаного проката применяют непрерывные, а также одно- и двухклетевые реверсивные станы, оснащенные четырехшестивалковыми клетями, с длиной бочки валков 1200–2500 мм [3–6]. Подавляющее большинство из них предназначено для выпуска продукции широкого сортамента как по толщине, так и по ширине, что связано с необходимостью частого изменения начальной настройки рабочих клетей, поскольку значения параметров R/h_0 (где R, h_0 – радиус рабочего валка и толщина полосы на входе в очаг деформации) и b/L (где b, L – ширина полосы и длина бочки валков) изменяются соответственно в пределах 100–3000 и 0,4–0,9.

Кроме того, холодная прокатка тонких и особо тонких полос осуществляется с малыми абсолютными обжатиями Δh ($\Delta h \le$ 0,005–0,5 мм) и с большими средними контактными нормальными напряжениями $p_{срс}$ ($p_{срс} \ge$ 500–1500 Н/мм^2). В этих условиях прокатки упругие деформации радиального сжатия рабочих валков и упругие деформации полосы становятся одним из основных факторов, определяющих уровень параметров процесса. В результате упругого сжатия валков и упругого восстановления полосы происходит существенное увеличение длины очага деформации l_c, что вызывает рост контактных нормальных напряжений $p_{срс}$, силы P_c, момента M_c и мощности N_c прокатки. Этим объясняется тот факт, что сила, действующая на нажимные винты рабочих клетей промышленных станов, при холодной прокатке полос шириной 1000 мм достигает 10–20 МН. Принимая во внимание, что модуль жесткости рабочих клетей действующих станов холодной прокатки находится в диапазоне 4,5–7,5 МН/мм [5–9], упругие деформации $\delta_{кл}$ последних при указанных выше значениях силы прокатки достигают 1,5–4,5 мм. Поэтому процесс холодной прокатки тонких и особо тонких полос на промышленных станах осуществляется практически всегда в условиях, когда валки до начала прокатки находятся в «забое», то есть прижаты силой $P_{пр}$ [6, 7].

Цель работы. Определение параметров начальной настройки рабочих клетей при холодной прокатке тонких и особо тонких полос имеет свои особенности, которые в настоящее время изучены недостаточно полно. В частности, не учтено влияние силы забоя концевых участков рабочих валков $P_з$ в процессе прокатки, что существенно. Остается открытым также вопрос об определении наименьшей толщины полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане. Задачи, вытекающее из обозначенного круга вопросов, являются актуальными, и их решение имеет важное научное и прикладное значение. Поэтому они и определили цель настоящего исследования.

Постановка задачи и методика исследований. При прокатке тонких и особо тонких полос концевые участки бочек рабочих валков на действующих станах практически при любых значениях силы прокатки P_c и параметра b/L < 0,8 находятся в «забое» в процессе прокатки, то есть прижаты силой $P_з$ [10]. Поэтому на рабочие валки, в процессе прокатки, а, следовательно, и на нажимные винты рабочей клети, действуют две силы (без учета влияния сил уравновешивания верхнего полукомплекта валков и гидромеханического профилирования валков) – сила прокатки P_c и сила «забоя» $P_з$. Следовательно, сила, действующая на нажимные винты $P_{нв}$ при прокатке тонких и особо тонких полос, равна:

$$P_{нв} = P_c + P_з, \qquad (1)$$

и известное ограничение по силе прокатки ($P_c \le [P]$) следует записывать в виде:

$$P_{нв} \le [P], \qquad (2)$$

где $[P]$ – допустимое значение силы на нажимные винты.

Вероятность появления силы $P_з$ и ее величина возрастают с уменьшением толщины прокатываемой полосы h_1 и параметра b/L, а также с увеличением силы прокатки P_c. При b/L = 1,0 сила $P_з$ равна нулю, независимо от значений h_1 и P_c. Закономерности взаимодействия и параметры начальной настройки рабочих клетей при прокатке толстых и тонких широких полос рассмотрены подробно в литературе [6, 7].

При прокатке тонких и особо тонких относительно узких полос суммарная стрела прогиба активных образующих рабочих валков $2\delta_{ао}$ [8, 10] обычно превышает толщину полосы h_1, и зазор S_{1k} вблизи торцов их бочек приобретает отрицательные значения ($S_{1k} <$ 0). В этом случае, как уже отмечалось выше, концевые участки бочек рабочих валков в процессе прокатки находятся в «забое», то есть прижаты силой $P_з$ и сила, действующая на нажимные винты, выражается уравнением (1). Кроме того, рабочие валки до прокатки прижаты силой $P_{пр}$. Значения сил $P_{пр}$ и $P_з$, которые являются параметрами начальной настройки рабочей клети, находят в результате решения системы:

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= \frac{P_c + P_з - P_{пр}}{M_{кл}} \\ P_c &= \varphi(h_1) \\ P_з &= \varphi(h_1) \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

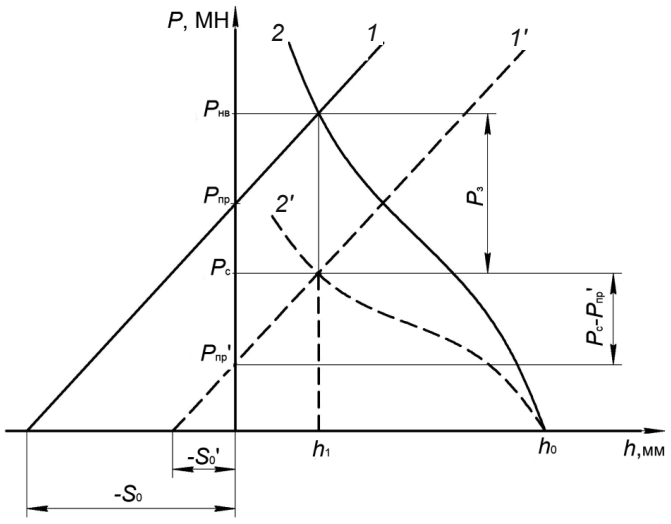
где P_c – сила прокатки; $P_з$ – сила «забоя» концевых участков бочек валков; $P_{пр}$ – сила предварительного прижатия валков.

Основные проблемы при решении системы (3) связаны с определением функций $P_c = \varphi(h_1)$ и $P_з = \varphi(h_1)$. Возможности и пути построения кривой пластичности $P_c = \varphi(h_1)$ рассмотрены ранее и опубликованы в литературе [6–9]. Возможности определения функций $P_з = \varphi(h_1)$ изложены ниже.

На рисунке представлено графическое решение системы (3) для случаев прокатки, когда процесс осуществляется с «забоем» концевых участков рабочих валков (сплошные линии *1* и *2*) и без такового (штриховые линии *1*' и *2*').

Из рисунка следует, что когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки (сплошные линии *1* и *2*), получение требуемой толщины полосы h_1 достигается при более высоких значениях сил $P_{нв}$ и $P_{пр}$ или при большей величине отрицательного зазора между валками до прокатки ($-S_0 = P_{пр}/M_{кл}$). Разность ординат кривых *2* и *2*' при $h = h_1$ численно равна силе забоя концевых участков рабочих валков в процессе прокатки $P_з$. Таким образом, учет влияния силы $P_з$ при начальной настройке рабочей клети сводится к увеличению силы предварительного прижатия валков с $P_{пр}$' до $P_{пр}$ или к увеличению отрицательного зазора между ними с S_0' до S_0.

Для аналитического решения системы (3) необходимо найти функцию $P_з = \varphi(h_1)$. Наиболее точное



Графическое решение системы (3) по определению параметров начальной настройки рабочей клети при прокатке с «забоем» концевых участков рабочих валков

определение силы $P_з$ может быть реализовано в результате совместного решения уравнения прокатки и задачи о напряженно-деформированном состоянии валков [8]. Приближенно силу $P_з$ можно определить по сближению осей бочек рабочих валков на участках их непосредственного контакта [8, 9]. Расчет силы прокатки $P_с$ производили по хорошо апробированной методике, учитывающей влияние упругих деформаций валков и полосы коэффициента трения, деформационных и температурно-скоростных условий прокатки [11].

Результаты исследований и их анализ. Расчеты силы забоя $P_з$ с использованием методик, приведенных в работах [8, 9], показали, что в случае применения цилиндрических валков в последних клетях на двух- и шестиклетевом станах 1400 ОАО «АрселорМиталл Темиртау» [4] при прокатке жести 0,145-0,36х855-890 мм (b/L = 0,61–0,64) ее значения, в зависимости от предела текучести исходного подката и принятых режимов деформации, могут достигать 0,2–0,9 $P_с$. Такие большие величины силы $P_з$ приводят к увеличению нагрузки на нажимные винты и к снижению обжимающей способности рабочих клетей, к увеличению контактных напряжений на концевых участках рабочих валков, их дополнительному разогреву, быстрому износу и разрушению, а также к дополнительному расходу энергии на преодоление сопротивления сил трения качения на концевых участках бочек рабочих валков, находящихся в «забое», что нежелательно и в большинстве случаев недопустимо. Вместе с тем прижатие («забой») концевых участков бочек рабочих валков на некоторой длине, примыкающей к кромкам полосы, целесообразно, так как это обеспечивает поперечную устойчивость полосы в процессе прокатки [7–9, 12]. Поэтому на практике стремятся к определению оптимальной или некоторой приемлемой минимальной величины силы $P_з$. Для минимизации величины силы $P_з$ применяют подходящие профилировки рабочих и опорных валков, рабочие клети с осевой сдвижкой рабочих или промежуточных (на шестивалковых клетях) валков или клети, оснащенные валками системы *CVC*, либо другие технические решения, направленные на достижение этой цели [12].

Система уравнений (3) отражает особенности нагружения валкового узла и настройки рабочей клети при прокатке тонких и особо тонких полос, что позволяет использовать ее также для определения «наименьшей толщины полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане с наибольшим обжатием». С этой целью первое уравнение этой системы может быть записано в виде:

$$h_{1нм} = \frac{P_с + P_з - P_{пр}}{M_{кл}} = \delta_{клс} + \delta_{клз} + \delta_{клпр}, \qquad (4)$$

где $\delta_{клс}$, $\delta_{клз}$, $\delta_{клпр}$ – упругие деформации рабочей клети, вызванные силами прокатки $P_с$, забоя концевых участков рабочих валков $P_з$ и предварительного прижатия валков $P_{пр}$ соответственно.

Из уравнения (4) видно, что наименьшая толщина полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется упругими деформациями клети, вызванных силами $P_с$, $P_з$ и $P_{пр}$, то есть жесткостью всей рабочей клети, а не только радиальной жесткостью рабочих валков, как полагали исследователи, ранее пользующиеся вместо термина «наименьшая толщина прокатываемой полосы $h_{1нм}$», термином «минимальная толщина прокатываемой полосы h_{1min}» [5, 9]. На необоснованность и ошибочность термина «минимальная толщина полосы h_{1min}» и соответствующих моделей для ее определения было обращено внимание также в работе [10].

Как следует из уравнения (4), абсолютная величина наименьшей толщины полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется только жесткостью рабочей клети и технологическими ограничениями. Принимая во внимание (1) и (2), уравнение (4) представилось в виде:

$$h_{1нм} = \frac{P_{нв} - P_{пр}}{M_{кл}} \le \frac{[P] - P_{пр}}{M_{кл}}. \qquad (5)$$

Анализ последнего уравнения показывает, что наименьшая толщина полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане, определяется разностью двух сил – допускаемого значения силы, действующей на нажимные винты, и силы предварительного прижатия валков перед прокаткой. Очевидно, что чем меньше разность значений этих сил, тем меньше толщина полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на конкретном стане. Но это возможно только при высоком и соизмеримом уровне сил $P_{нв}$ и $P_{пр}$ и подтверждает хорошо известный из практики факт, что холодная прокатка тонких и особо тонких полос реализуется с «большими силами и с малыми крутящими моментами».

Для проверки точности и работоспособности уравнения (4) на двухвалковом лабораторном стане 200 было проведено специальное исследование, в ходе которого прокатывали отожженные образцы из

Расчетные и экспериментальные значения толщины $h_{1нм}$ при прокатке на лабораторном стане 200

	Параметры прокатки									
	h_0, мм	ε	$\sigma_т$, Н/мм²	$2k_{ср}$, Н/мм²	f	$P_{пр}$, кН	$p_{срс}$, Н/мм²	$P_с$, кН	экспериментальные h_1	расчетные по модели $h_{1нм}$
1	0,252	0,263	260	498	0,167	21,0	1288	268	0,186	0,189
2	0,249	0,259					1287	269	0,185	0,188
3	0,253	0,261					1273	266	0,187	0,186
4	0,251	0,258					1271	264	0,186	0,184
5	0,252	0,26					1274	265	0,186	0,185
6	0,253	0,261					1273	267	0,187	0,186
7	0,252	0,26					1274	268	0,186	0,187
8	0,255	0,263					1270	265	0,188	0,185
9	0,254	0,262					1271	266	0,187	0,186
10	0,253	0,261					1273	267	0,187	0,186

стали 08кп [$\sigma_т = \sigma_{тисх} + 34{,}6(100\varepsilon_\Sigma)^{0{,}6}$] с номинальными размерами 0,22-0,25х47,5х300 мм без применения технологической смазки и натяжения со скоростью 0,3 м/с. Валки стана специальной конструкции были изготовлены из стали 9ХФ, имели диаметр 201,2 мм, длину бочки 50 мм и шлифованную рабочую поверхность с твердостью 92 *HSD*. Прокатку вели в предварительно прижатых валках. Сила предварительного прижатия валков $P_{пр}$ ограничивалась возможностями ручного нажимного устройства и не превышала 18–22 кН. Значение параметра *b/L* равнялось 0,95, что исключало возможность забоя свободных (концевых) участков бочек валков в процессе прокатки. В ходе экспериментов измеряли толщину и ширину образцов до и после прокатки, значения силы предварительного прижатия валков $P_{пр}$ и силы, действующей на нажимные винты $P_{нв}$, которая в данном случае равнялась силе прокатки $P_с$. Измерение перечисленных параметров осуществляли по общепринятым методикам. В таблице представлены рассчитанные по уравнению (4), то есть теоретические и экспериментальные значения толщины образцов после прокатки, которые рассматривались в качестве наименьших $h_{1нм}$, поскольку ограничивались параметрами начальной настройки (силой $P_{пр}$) и жесткостью рабочей клети лабораторного стана ($M_{кл}$ = 1,32 МН/мм).

Из таблицы видно, что экспериментальные и рассчитанные по уравнению (4) значения наименьшей толщины прокатываемой полосы $h_{1нм}$ практически совпали. Это подтверждает точность, надежность и работоспособность уравнения (4) для прогнозирования наименьшей толщины прокатываемой полосы $h_{1нм}$, что дает основание рекомендовать его для практического применения.

Выводы

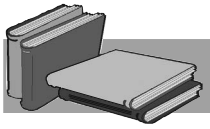
Исследованы особенности силового взаимодействия тонкой полосы с валками и с рабочей клетью в целом при холодной прокатке. В большинстве случаев при решении поставленной задачи обычно учитывают только особенности контактного взаимодействия полосы с рабочими валками, что необходимо, но недостаточно. Показано, что формирование толщины полосы при прокатке происходит в результате совместного взаимодействия последней с рабочими валками и с рабочей клетью в целом. Такой подход при решении данной задачи использован в настоящей статье.

Пластическая деформация полосы при холодной прокатке осуществляется с малыми абсолютными обжатиями Δh ($\Delta h \le 0{,}005$–$0{,}5$ мм) и с большими средними контактными напряжениями $p_{срс}$ ($p_{срс} >$ 500–1500 Н/мм²). В этих условиях прокатки упругие деформации валков и полосы оказывают решающее влияние на погонную силу прокатки $P_с/b$ (где $P_с$, b – сила прокатки и ширина прокатываемой полосы), значения которой достигают 8–20 кН/мм, что приводит к увеличению силы прокатки на действующих станах холодной прокатки до 15–25 МН и более.

Из-за низких значений модуля жесткости рабочих клетей $M_{кл}$ ($M_{кл}$ = 4,5–7,5 МН/мм) действующих станов холодной прокатки, упругие деформации последних $\delta_{кл}$ многократно превышают толщину полосы на выходе из очага деформации h_1 ($\delta_{кл} >> h_1$), и процесс прокатки реализуется всегда в предварительно прижатых валках с силой $P_{пр}$, что ухудшает условия эксплуатации валков и ограничивает возможности технологического оборудования для прокатки полос малой толщины. Установлено, что с уменьшением толщины и ширины полосы b вследствие уменьшения параметра *b/L* (где L – длина бочки валков), концевые участки бочек рабочих валков, каждый длиной менее 0,5(L-b), в процессе прокатки также находятся в «забое», то есть прижаты силой $P_з$, которая суммируется с силой прокатки $P_с$. Это приводит к дополнительному нагружению и ужесточению условий работы валков и, как следствие, к дополнительному ограничению возможностей оборудования для прокатки полос меньшей толщины.

Впервые решена задача по определению параметров начальной настройки рабочей клети при прокатке, когда концевые участки рабочих валков находятся в «забое» в процессе прокатки и предложено решение для определения наименьшей толщины полосы $h_{1нм}$, которая может быть прокатана на кон-

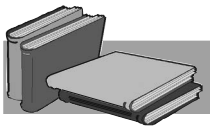
кретном стане. Экспериментальная проверка расчетного определения параметров начальной настройки и наименьшей толщины полосы, которая может быть прокатана на конкретном стане $h_{1нм}$, подтвердила работоспособность и достаточную точность предложенных решений, что дает основание рекомендовать их для практического применения при расширении сортамента выпускаемой продукции на действующих станах, в сторону уменьшения толщины прокатываемых полос и при проектировании сортамента на новых станах для прокатки тонких и особо тонких полос, в том числе жести и фольги.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Федонин О.В., Урну С.Я., Немкин М.В., Даниленко Д.Н., Кондауров Е.Л.* Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках. *Металлург*. 2011. № 5. С. 9–16.
2. *Василев Я.Д., Замогильный Р.А., Самокиш Д.Н.* Тенденции развития производства и потребления жести в мире. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2017. № 9. С. 61–67.
3. *Антипин В.Г., Зиновьева Н.Г., Овчинников А.М.* Черная металлургия США. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2014. № 2. С. 3–21.
4. *Коновалов Ю.В.* Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2010. 608 с.
5. *Королев А.А.* Конструкция и расчет машин и агрегатов прокатных станов. 2-е изд. перераб и доп. М.: Металлургия, 1985. 376 с.
6. *Василев Я.Д., Сафьян М.М.* Производство полосовой и листовой стали. Киев: Вища школа, 1976. 292 с.
7. *Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С., Классен Э.Я.* Повышение точности листового проката. М.: Металлургия, 1969. 264 с.
8. *Полухин В.П.* Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. М.: Металлургия, 1972. 512 с.
9. *Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П.* Тонколистовая прокатка и служба валков. М.: Металлургия, 1967. 388 с.
10. *Василев Я.Д., Дементиенко А.В.* Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. Непрерывная прокатка: Коллективная монография. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. С. 137–293.
11. *Василев Я.Д., Самокиш Д.Н., Дементиенко А.В., Завгородний М.И.* Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2014. № 1. С. 50–58.
12. *Будаква А.А.. Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н., Качалка З.Г., Паргамонов Е.А.* Профилирование валков листовых станов. Киев, 1986. 190 с.

Поступила 04.01.2019



REFERENCES

1. *Fedonin, O.V., Urnu, S.Ya., Nemkin, M.V., Danilenko, D.N., Kondaurov, E.L.* (2012). Prospects for the development of cold-rolled steel production in the world and Russian markets. *Metallurg. Metallurgist,* no. 5, pp. 9–16 [in Russian].
2. *Vasilev, Ya.D., Zamogilniy, R.A., Samokish, D.N.* (2017). Trends in the development of production and consumption of tinplate in the world. *Chernaya metallurgiya: Biuleten' Instituta "Chermetinformatsiya". Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 9, pp. 61–67 [In Russian].
3. *Antipin, V.G., Zinov'eva, N.G., Ovchinnikov, A.M.* (2014). Ferrous metallurgy of USA. Chernaya metallurgiya: *Biuleten' Instituta "Chermetinformatsiya". Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya*", no. 2, pp. 3–21 [in Russian].
4. *Konovalov, Yu.V.* (2010). Directory by rolling specialist. Reference book in 2 books. Book 2. Production of cold-rolled sheets and strips. Moscow: Teplotekhnik, 608 p. [in Russian].
5. *Korolev, A.A.* (1985). Design and calculation of machines and units of rolling mills. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow: Metallurgiya, 376 p. [in Russian].
6. *Vasilev, Ya.D., Saf'yan, M.M.* (1976). Production of strip and sheet steel. Kyiv: Vyshcha shkola, 192 p. [in Russian].
7. *Meerovich, I.M., Gertsev, A.I., Gorelik, V.S., Klassen, E.Ya.* (1969). Improving the accuracy of sheet metal. Moscow: Metallurgiya, 264 p. [in Russian].
8. *Poluhin, V.P.* (1972). Mathematical modeling and computer calculation of sheet rolling mills. Moscow: Metallurgiya, 512 p. [in Russian].
9. *Poluhin, P.I., Zheleznov, Yu.D., Poluhin, V.P.* (1967). Sheet rolling and rolls service. Moscow: Metallurgiya, 388 p. [in Russian].
10. *Vasilev, Ya.D., Dementienko, A.V.* (2002). Continuous rolling of thin and extremely thin strips. *Continuous rolling: Collective monograph.* Dnipropetrovsk, Dnipro-VAL Publ., pp. 137–293 (In Russian)
11. *Vasilev, Ya.D., Samokish, D.N., Dementienko, A.V., Zavgorodniy, M.I.* (2014). Unified method of calculating energy and temperature-speed parameters of the process of cold strip rolling. C*hernaya metallurgiya: Biuleten' Instituta "Chermetinformatsiya". Ferrous metallurgy: Bulletin of the Institute "Chermetinformatsiya"*, no. 1, pp. 50–58 [in Russian].
12. *Budakva, A.A., Konovalov, Yu.V., Tkalich, K.N., Kachalka, Z.G., Pargamonov, Ye.A.* (1986). Profiling rolls of sheet mills. Kyiv, 190 p. [in Russian].

Received 04.01.2019

Анотація

Я.Д. Василев, д-р техн. наук, професор
Р.О. Замогильний, мол. наук. співр., e-mail: rz90@i.ua

Національна металургійна академія України (НМетАУ), Дніпро, Україна

Вплив особливостей контактної взаємодії тонкої штаби з валками на параметри початкового налаштування робочої кліті і найменшу товщину штаби, що прокатується

Досліджено особливості силової взаємодії тонкої штаби з валками і з робочою кліттю в цілому при холодній прокатці. Показано, що при холодній прокатці тонких штаб, пружні деформації валків і штаби мають вирішальний вплив на погонну силу прокатки P_c/b. Представлено дані, які підтверджують, що формування товщини штаби при прокатці відбувається в результаті спільної взаємодії останньої з робочими валками і з робочою кліттю в цілому.
Через низькі значення модуля жорсткості робочих клітей $M_{кл}$ ($M_{кл}$ = 4,5–7,5 МН/мм) діючих станів холодної прокатки пружні деформації останніх $\delta_{кл}$ багаторазово перевищують товщину штаби на виході з осередку деформації h_1 ($\delta_{кл} >> h_1$), і процес прокатки реалізується завжди в попередньо притиснутих валках з силою $P_{пр}$, що обмежує можливості обладнання для прокатки штаб малої товщини. Зі зменшенням товщини і ширини штаби b внаслідок зменшення параметра b/L (де L – довжина бочки валків), кінцеві ділянки бочок робочих валків в процесі прокатки також знаходяться в «забої», тобто притиснуті силою $P_з$, яка підсумовується з силою прокатки P_c, що призводить до додаткового навантаження валків і, як наслідок, до додаткового обмеження можливостей обладнання для прокатки штаб меншої товщини.
Вперше вирішено задачу з визначення параметрів початкової настройки робочої кліті під час прокатки, коли кінцеві ділянки робочих валків знаходяться в «забої» в процесі прокатки і запропоновано рішення для визначення найменшої товщини штаби $h_{1нм}$, яка може бути прокатана на конкретному стані. Експериментальна перевірка розрахункового визначення параметрів початкової настройки і найменшої товщини штаби, яка може бути прокатана на конкретному стані $h_{1нм}$, підтвердила працездатність і достатню точність запропонованих рішень, що дає підставу рекомендувати їх для практичного застосування при розширенні сортаменту продукції, що випускається на діючих станах, в сторону зменшення товщини штаб, що прокатуються, і при проектуванні сортаменту на нових станах для прокатки тонких і особливо тонких штаб, в тому числі жерсті і фольги.

Ключові слова

Холодна прокатка, стан, натискний пристрій, сила, пружна деформація, взаємодія, штаба, товщина.

Summary

Ya.D. Vasilev, Doctor of Engineering Sciences, Professor
R.A. Zamogilny, Junior Researcher, e-mail: rz90@i.ua

National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), Dnipro, Ukraine

Influence of the special features of contact interaction of the thin strip with rolls on the parameters of the initial setting of the working stand and the least thickness of the rolled strip

The features of the force interaction of a thin strip with rollers and with a working stand as a whole during cold rolling are investigated. It is shown, that during cold rolling of thin strips, the elastic deformations of the rolls and the strips have a decisive influence on the linear rolling force P_c/b. The data are presented confirming, that the formation of the strip thickness during rolling occurs as a result of the joint interaction of the strip with the work rolls and with the working stand as a whole.
Due to the low modulus of stiffness of the working stands, $M_{кл}$ ($M_{кл}$ = 4.5–7.5 MN/mm) of the cold rolling mills in operation, the elastic deformations of the last $\delta_{кл}$ are many times greater than the thickness of the strip at the exit from the deformation zone h_1 ($\delta_{кл} >> h_1$) and the rolling process is always implemented in pre-pressed rollers with a power $P_{пр}$, which limits the ability of the equipment for rolling strips of small thickness. With a decrease in the thickness and width of the strip b due to a decrease in the parameter b/L (where L is the length of the roll barrel), the end sections of the barrels of the work rolls in the rolling process are also in the "bottom face", i. e. pressed force $P_з$, which is summed with the force rolling P_c, which leads to additional loading of the rolls and, as a consequence, to an additional limitation of the equipment for rolling strips of smaller thickness.
For the first time, the problem of determining the parameters of the initial setting of the working stand during rolling was solved, when the end sections of the work rolls are in the "bottom" during the rolling process and a solution is proposed for determining the smallest strip thickness $h_{1нм}$, that can be rolled on a particular mill. The experimental verification of calculation of the parameters of the initial setting and the smallest thickness of the strip, which can be rolled up at a specific state $h_{1нм}$,

confirmed the efficiency and sufficient accuracy of the proposed solutions, which makes it possible to recommend them for practical application in expanding the range of products produced in operating states in the direction reducing the thickness of the strip that are rolled out and designing the assortment at the new mills for the rolling of thin and especially thin strips, including tinplate and foil.

Keywords *Cold rolling, rolling mill, screw device, force, elastic deformation, interaction, strip, thickness.*

УДК 621.771.294.003.12(043)

А.И. Бабаченко[1], д-р техн. наук, ст. науч. сотр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4710-0343

А.А. Кононенко[1], канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7446-4105

Р.В. Подольский[2], студент, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1219-348X

Ж.А. Дементьева[1], мл. науч. сотр. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8863-4558

Е.А. Шпак[1], вед. инж. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6707-0877

О.Ф. Клиновая[1], вед. инж. отдела проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

[1]Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, Днепр, Украина
[2]Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Надежность железнодорожных колес, изготовленных разными способами производства

Исследованы различные показатели надежности литых и цельнокатаных железнодорожных колес. Установлено, что литые колеса (класс С по AAR M-107/M-208), имея высокие значения прочностных свойств (временное сопротивление и твердость), по таким важным показателям надежности как относительное сужение, относительное удлинение, ударная вязкость и вязкость разрушения значительно уступают цельнокатаным колесам (марка Т и 2 по ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при этом уровень относительно удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Установлено, что наличие большого количества крупных неметаллических включений неблагоприятной (лентообразной) формы может привести к возникновению трещины, которая в сочетании с литой, направленной структурой в сечении железнодорожных колес способствует распространению возникшей трещины. С позиции механики разрушения неметаллические включения являются концентраторами напряжений, такими же, как микротрещины. При этом максимальное напряжение у вершины сульфидного включения, ленточного или эвтектики, характерных для литого колеса, длина которых составляет около 0,05 мм, при толщине 0,005 мм, при напряжении в ободе колеса 500 МПа, может достигать величины порядка 3200 Н/мм$^{3/2}$, что превышает допустимый уровень коэффициента интенсивности напряжений для этих колес в 2 раза. Для цельнокатаного колеса характерна плотная однородная макроструктура; микроструктура цельнокатаного колеса равномерная, а неметаллические включения имеют округлую форму.

Также низкие значения ударной вязкости, которая характеризует способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки, особенно при минусовых температурах, способствуют повышению вероятности неконтролируемого разрушения изделий в процессе эксплуатации. Установлено, что при пониженных температурах литое колесо имеет значение ударной вязкости в несколько раз ниже, чем цельнокатаные колеса. Определение сферы возможного применения литых колес требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: *железнодорожное колесо, неметаллические включения, интенсивность напряжений, механические свойства, микроструктура.*

Введение. От железнодорожных колес требуется очень высокая надежность, важной характеристикой которой является прочность. Однако на надежность железнодорожного колеса влияют и такие его характеристики трещиностойкости, как ударная вязкость, в том числе при пониженных температурах, вязкость разрушения.

Условия эксплуатации железнодорожного транспорта являются сложными, что обусловлено сезонами с низкими и высокими температурами, сложным рельефом местности. Важной задачей является обеспечение безопасности движения подвижного состава, в том числе и за счет использования колес с высокими качественными показателями, которые обеспечивают безотказную эксплуатацию.

Так как обод колеса работает в паре трения с рельсом, то он, в первую очередь, должен иметь высокую износостойкость, что определяется его твердостью. С другой стороны, для обеспечения эксплуатационной надежности колеса необходимо, чтобы его обод имел достаточный запас вязкости, что в некоторых случаях может быть связано с необходимостью снижения прочности (твердости). Эти в какой-то степени противоречивые требования по механическим свойствам и определяют сложность проблемы обеспечения надежности обода колеса.

Постановка задачи. Надежность колес в эксплуатации в значительной степени обеспечивается соответствием нормативной документации, в которой отражены требования к механическим свойствам стали колес, основные методы испытаний и контроля качества колес и допустимые при этом нормы. На уровень надежности оказывает влияние множество факторов, одним из которых является и способ производства. Наибольшее распространение получили цельнокатаные и литые железнодорожные колеса. Для оценки перспективности использования на железных дорогах Украины литых железнодорожных колес необходимо оценить их основные показатели качества в сравнении с цельнокатаными колесами.

Цель работы: выполнить аналитическую оценку и сравнительные экспериментальные исследования показателей надежности железнодорожных колес (в соответствии с требованиями ДСТУ ГОСТ 10791:2016), изготовленных разными способами.

Объект и методика исследований. Материалом для исследований были колеса производства компании Griffin Wheel в Winnipeg, Канада (код производителя GT) в 2004 году из стали марки С (рис. 1). Для сравнительных исследований были выбраны железнодорожные колеса, изготовленные из сталей марок 2 и Т по ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Химический состав исследуемых железнодорожных колес приведен в табл. 1.

Из отобранных колес были вырезаны пробы для изготовления образцов для проведения сравнительных исследований макроструктуры, микроструктуры и механических свойств в рамках требований ДСТУ ГОСТ 10791:2016, а также для сравнительной оценки показателей надежности и долговечности железнодорожных колес, которые не регламентируются указанным стандартом.

Результаты исследований. Сравнительный анализ требований нормативных документов показал, что химический состав литых колес класса С по стандарту AAR M-107/M-208 не соответствует требованиям как европейского стандарта на цельнокатаные колеса EN 13262 [1], так и отечественного стандарта ДСТУ ГОСТ 10791:2016, в которых предусмотрено использование сталей с более низким содержанием углерода, чем в литых колесах.

Литые колеса производятся в основном из углеродистых марок стали с высоким содержанием углерода (до 0,77 % С и выше), по сравнению с колесами повышенной твердости по ДСТУ ГОСТ 10791:2016 (до 0,7 % С). Такая тенденция обусловлена тем, что чем выше содержание углерода, тем ниже должна быть температура разливки, легче осуществляется операция литья, меньше влияние на графитовые

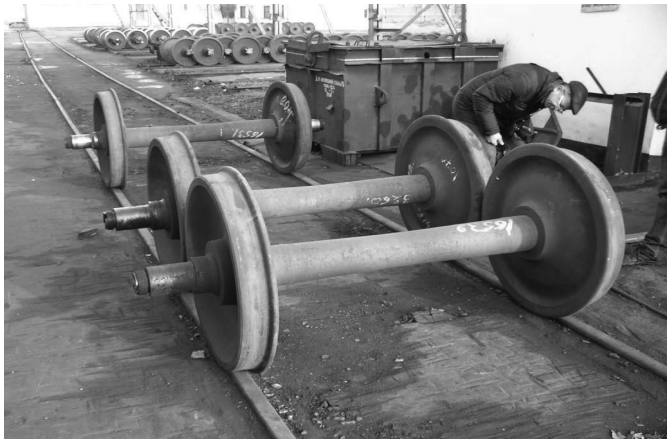


Рис. 1. Колесные пары с исследуемыми колесами

формы, лучше жидкотекучесть стали, ниже вероятность образования литейных трещин, газовых раковин и пригара. Кроме того, углерод проявляет большую склонность к ликвации. Но в стали с высоким содержанием углерода при охлаждении кристаллы, которые образуются в разные моменты времени процесса затвердевания, имеют разный состав по легирующим и примесным элементам. В результате ликвации различные области стальной отливки могут иметь разную температуру плавления, разную усадку, различную структуру и т. п. Отсюда возникает опасность появления в стальных отливках неоднородности механических свойств.

Кроме того, для литой структуры кроме химической неоднородности, характерны дефекты усадочного происхождения. Жидкий металл имеет бо̀льший удельный объем, чем твердый, поэтому металл, залитый в форму, уменьшается в объеме при кристаллизации, что приводит к образованию пустот, которые называются дефектами усадочного происхождения, которые концентрируются в основном в осевой зоне слитка [2]. После завершения затвердевания в макроструктуре заготовок усадочные раковины обычно окружены наиболее загрязненной частью металла, в котором наблюдаются также несплошности, такие как микро- и макропоры, пузырьки.

Контроль макроструктуры в работе проводили по ГОСТ 10243 на поперечных темплетах. В требованиях к макроструктуре железнодорожных колес в ДСТУ ГОСТ 10791:2016 отмечено, что колеса должны быть без флокенов, расслоений, трещин, корочек, остатков усадочных раковин и недопустимых ликваций. Анализ макротемплетов исследуемых железнодорожных колес показал отсутствие вышеперечисленных дефектов. При этом в макроструктуре каждого элемента литого колеса наблюдается осевая пористость (рыхлость), которая содержит пустоты (поры).

Таблица 1

Химический состав исследуемых колес

Марка/класс стали	Содержание элементов, %мас.							
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	V
марка 2	0,61	0,74	0,35	0,007	0,005	0,09	0,04	–
марка Т	0,66	0,79	0,33	0,008	0,009	0,20	0,12	0,094
класс С	0,72	0,76	0,46	0,210	0,013	0,08	0,04	–

Направленная структура, связанная с наличием зоны столбчатых кристаллов, растущих от поверхности изделия до его центра, приводит к анизотропии механических свойств: прочностные и пластические свойства в перпендикулярном направлении дендритов отличаются от свойств в продольном направлении. Возникшая трещина будет беспрепятственно развиваться в направлении роста дендритов. Появление трещин в литой стали может быть обусловлено направленностью литой структуры, дендритной ликвацией (рис. 2).

При горячей пластической деформации колесной заготовки при производстве цельнокатаных колес, происходят существенные качественные изменения литой структуры: дробятся дендриты, измельчаются первичные зерна, деформируются или измельчаются неметаллические включения, устраняется межкристаллитная пористость, и существенно уменьшается химическая (ликвационная) неоднородность.

Микроструктура всех исследуемых образцов из литого колеса состоит из перлита, имеет неоднородное строение: слаботравящиеся и сильнотравящиеся полосы (участки). Формирование такой неоднородной микроструктуры объясняется наличием дендритной ликвации. По форме и направлению данных участков четко видны столбчатые и равноосные дендриты литой структуры, такие же, как были обнаружены при исследовании макроструктуры.

Микроструктура цельнокатаных железнодорожных колес ферритно-перлитная и более однородная, чем литого. Количество феррита в структуре больше, чем в литом колесе, это обусловлено различным содержанием углерода. Равномерность структуры достигается благодаря воздействию горячей пластической деформации и термической обработки, которые выравнивают негативные последствия неоднородности, возникающей при дендритной кристаллизации металла.

Одним из факторов, снижающих долговечность стальных изделий, в том числе и железнодорожных колес, являются неметаллические включения. Допустимую загрязненность ими готовой металлопродукции строго нормируют.

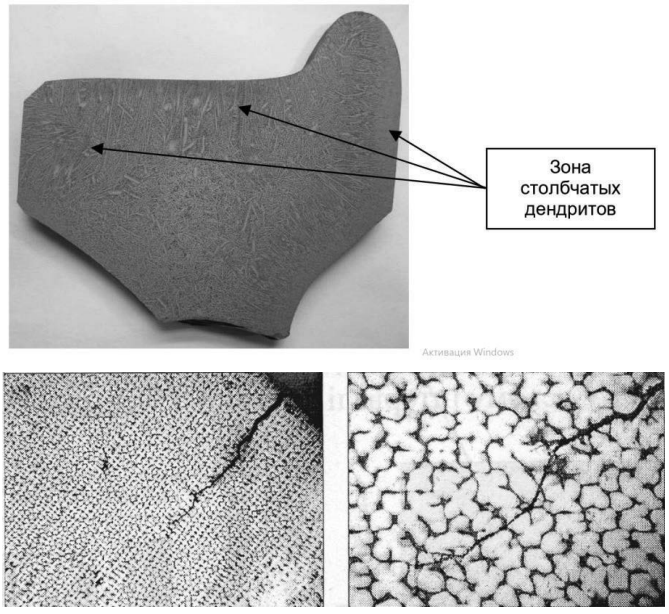


Рис. 2. Макротемплет обода литого колеса и распространение трещины в отливке по зоне столбчатых дендритов [3]

Неметаллические включения в стали являются инородными телами, нарушающими однородность ее структуры, поэтому их влияние на механические и другие свойства может быть значительным. При деформации стали неметаллические включения, особенно неправильной формы с острыми краями и углами, играют роль концентраторов напряжений и могут вызвать образование трещины, являющейся центром дальнейшего усталостного разрушения.

Решающее значение при изучении влияния неметаллических включений на качество стали имеют их свойства: размер, форма, химические и физические характеристики, а также характер расположения по отношению к границам зерен литого металла.

В соответствии с требованиями ГОСТ 10791-2011, оценивается загрязненность стали обода колеса неметаллическими включениями. Для комплексной оценки качества стали, изучение микроструктуры проводили во всех элементах литых железнодорожных колес – в ободе, диске и ступице.

Оценка загрязненности металла исследуемых колес выполнена в соответствии с ГОСТ 1778 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений». Учитывая отсутствие принципиальной разницы в способе производства металла и деформационной обработки для цельнокатаных колес из стали марок 2 и Т, исследования выполнены лишь на колесе из стали марки 2.

Во всех исследованных образцах, вырезанных из обода литого колеса, средний размер сульфидов соответствует 3 баллу, что превышает требования ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Размер неметаллических включений в других элементах колеса (диске и ступице) ДСТУ ГОСТ 10791:2016 не регламентирует, но проведенные исследования показали, что средний размер неметаллических включений (сульфидов) в диске и ступице литого колеса составляет 3,5 балла (рис. 3).

Сульфидные включения в цельнокатаном колесе (рис. 4), не превышают 1,5 балла по шкале С ГОСТ 1778-70, что соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016. Эти сульфиды имеют более округлую форму, чем в литом колесе, что делает менее негативным их влияние на показатели надежности, чем сульфидная эвтектика, которая имеет ленточную форму. Остальные неметаллические включения очень мелкие, поэтому их балл не определялся.

С точки зрения надежности железнодорожных колес, наибольшую опасность представляют включения с малым радиусом вершины. Изменение механических свойств в зависимости от пористости при прочих неизменных параметрах обусловлено не только уменьшением эффективного сечения нагруженного образца, но и возникновением локальной концентрации напряжений вблизи пор [4]. Современная механика разрушения исходит из того, что в материале всегда есть уже готовые дефекты, которые при определенных условиях могут хрупко развиваться.

В механике разрушения обычно рассматривается растяжение изотропной бесконечной пластины конечной толщины, в которой есть эллиптическая трещина с радиусом закругления *r*, который стремится к нулю [5]. Если длина трещины 2*c* значительно меньше ширины *a*, любая трещина действует как концентратор напряжений. У вершины трещины возникает максимальное напряжение:

$$S_m = 2S\,(c/r)^{1/2}, \quad (1)$$

где *S* – приложенное извне напряжение.

Из уравнения (1) следует, что при одной и той же внешней нагрузке у вершины трещины будут возникать напряжения, тем больше, чем она длиннее и острее. При определенных значениях *S, c* и *r* напряжение S_m превзойдет теоретическое сопротивление отрыва $S_{отр}$, межатомные связи в вершине трещины разорвутся, и трещина начнет развиваться.

Если принять, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений, такими же, как микротрещины, то максимальное напряжение, рассчитанное по уравнению (1), у вершины сульфидных включений, наблюдаемых в металле литого колеса, длина которых составляет около 0,05 мм, при толщине 0,005 мм, при напряжении в ободе колеса 500 МПа, может достигать величины порядка 3200 Н/мм$^{3/2}$, что превышает коэффициент интенсивности напряжений для этих колес в 2 раза. Это может привести к самопроизвольному нестабильному распространению трещины, зародившейся в вершине неметаллического включения и, впоследствии, к разрушению колеса. Кроме того, располагаясь вдоль дендритных ветвей в междендритном пространстве, неметаллические включения ориентированы, что еще в большей степени способствуют развитию возникшей трещины в литом колесе.

Глобулярные неметаллические включения, наблюдаемые в цельнокатаных колесах, у которых длина примерно равна толщине, более благоприятные по форме с точки зрения концентрации (увеличение) напряжений в его окрестностях. Так, при напряжении в ободе 500 МПа, для которого была рассчитана величина напряжения в вершине включения в литом колесе, интенсивность напряжения вокруг глобулярного включения в цельнокатаном колесе составит 1000 Н/мм$^{3/2}$, что более чем в 3 раза меньше, чем для ленточных сульфидных включений, и не превышает коэффициента интенсивности напряжения для металла катаных железнодорожных колес.

Надежность колес в эксплуатации в значительной степени определяется нормативной документацией, в которой отражены требования к механическим свойствам стали колес, основные методы испытаний и контроля качества колес и допустимые при этом нормы.

ДСТУ ГОСТ 10791:2016 регламентирует проведение целого ряда сдаточных механических испытаний на образцах как металла обода, так и диска железнодорожного колеса, что дает полную картину о качестве и надежности изделия. В работе были выполнены испытания исследуемых колес (литых колес класса С и цельнокатаных из стали марок 2 и Т) с определением величин временного сопротивления ($\sigma_в$) металла обода колеса, относительного удлинения (δ) и сужения (ψ), твердости обода колеса на глубине 30 мм от поверхности катания и ударной вязкости (KCU) обода и диска.

Как показали результаты механических испытаний (табл. 2), литые железнодорожные колеса имеют высокие значения твердости и временного сопротивления, что позволяет использовать данный вид продукции под вагонами с большой нагрузкой на ось. Эти характеристики также определяют высокие значения долговечности по износу. Однако литые колеса не соответствуют требованиям по пластичным и вязким характеристикам.

В настоящее время характеристики механики разрушения, среди которых особое место занимает критический коэффициент интенсивности напряжений $К_{1с}$, становятся одними из наиболее важных характеристик надежности для многих стальных изделий и конструкций повышенной прочности, в том числе и для железнодорожных колес. Знание этого параметра позволяет оценить сопротивляемость материала хрупкому разрушению.

Ранее проведенные исследования показали [6, 7], что вязкость разрушения $К_{1с}$ является структурно чувствительной характеристикой, а ее величина может изменяться в широких пределах в зависимости от структурного состояния колесной стали. Основными структурными параметрами, определяющими уровень значений $К_{1с}$ этих сталей, является величина действительного зерна, дисперсность продуктов распада аустенита, количество и характер распределения структурно-свободного феррита и неметаллических включений. Важное преимущество $К_{1с}$ по сравнению с другими характеристиками предельной прочности является то, что вязкость разрушения учитывает и длину трещины. Любой критерий разрушения, выраженный через напряжение, предусматривает, что разрушение происходит мгновенно после достижения этого напряжения. Однако, как доказано в настоящее время, любое разрушение – это результат развития трещины в своей критической длине, и поэтому характеристика предельной способности к торможению разрушения должна включать не только напряжение, но и длину трещины. Критический коэффициент интенсивности напряжений $К_{1с}$ характеризует трещиностойкость материалов в линейно-упругой области деформации и используется при оценке качества металлопроката из конструкционных сталей, а также эксплуатационных свойств изделий из этих сталей (железнодорожных колес, бандажей и т. д.) и является силовой характеристикой трещиностойкости.

ДСТУ ГОСТ 10791:2016 регламентирует значения вязкости разрушения ≥ 50 МПа·м$^{1/2}$ для железнодорожного подвижного состава с конструкционной скоростью до 200 км/ч и ≥ 70 МПа·м$^{1/2}$ для железнодорожного подвижного состава с конструкционной скоростью более 200 км/ч. Результаты испытаний показали, что литые железнодорожные колеса класса С имеют наименьшее значение вязкости разрушения по сравнению с цельнокатаными колесами из стали марок 2 и Т (табл. 2) и не соответствуют требованиям украинского стандарта.

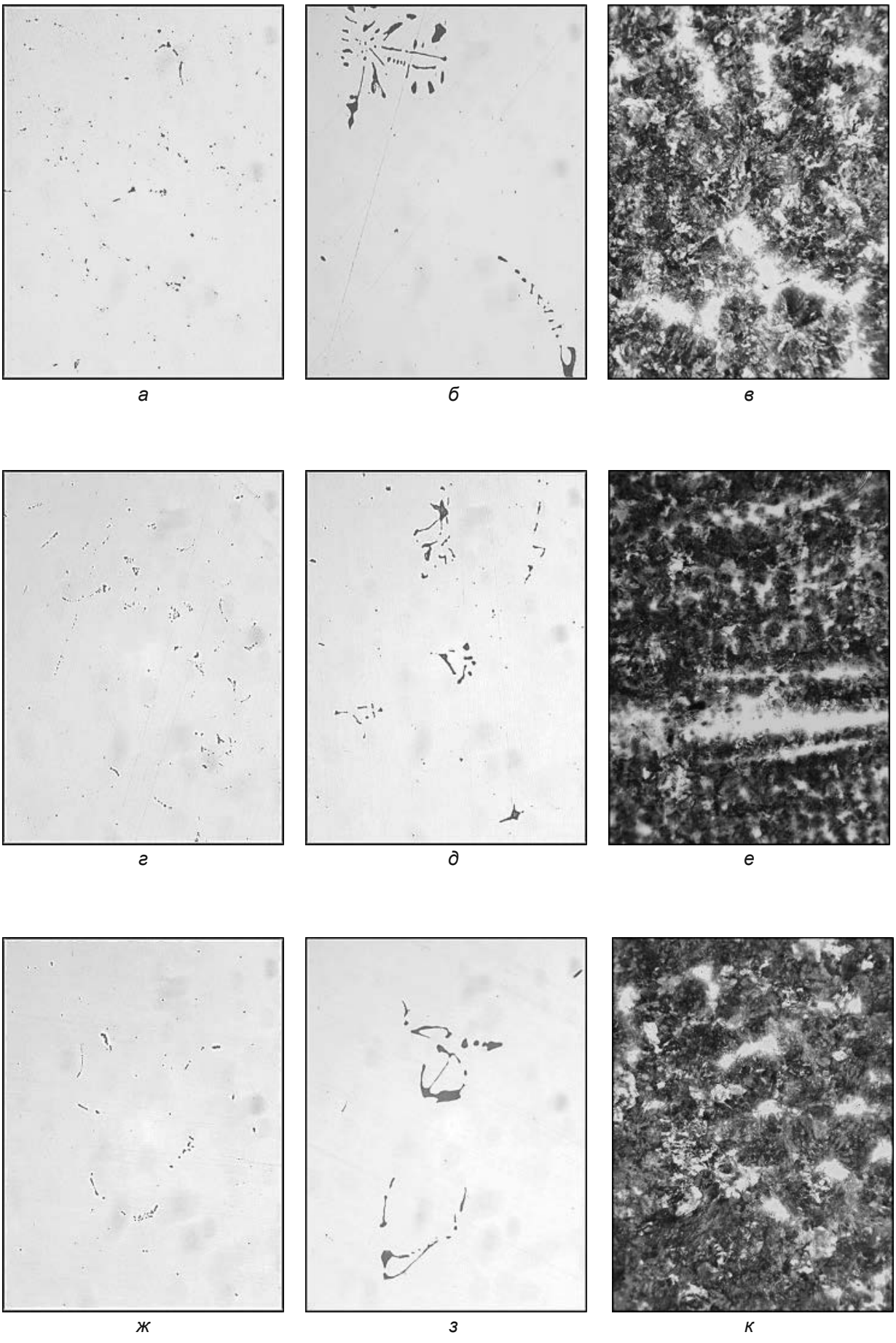


Рис. 3. Неметаллические включения в элементах литого колеса: *а, б, в* – обод; *г, д, е* – диск; *ж, з, к* – ступица; *а, г, ж* – ×100; *б, д, з* – ×400; *в, е, к* – ×50

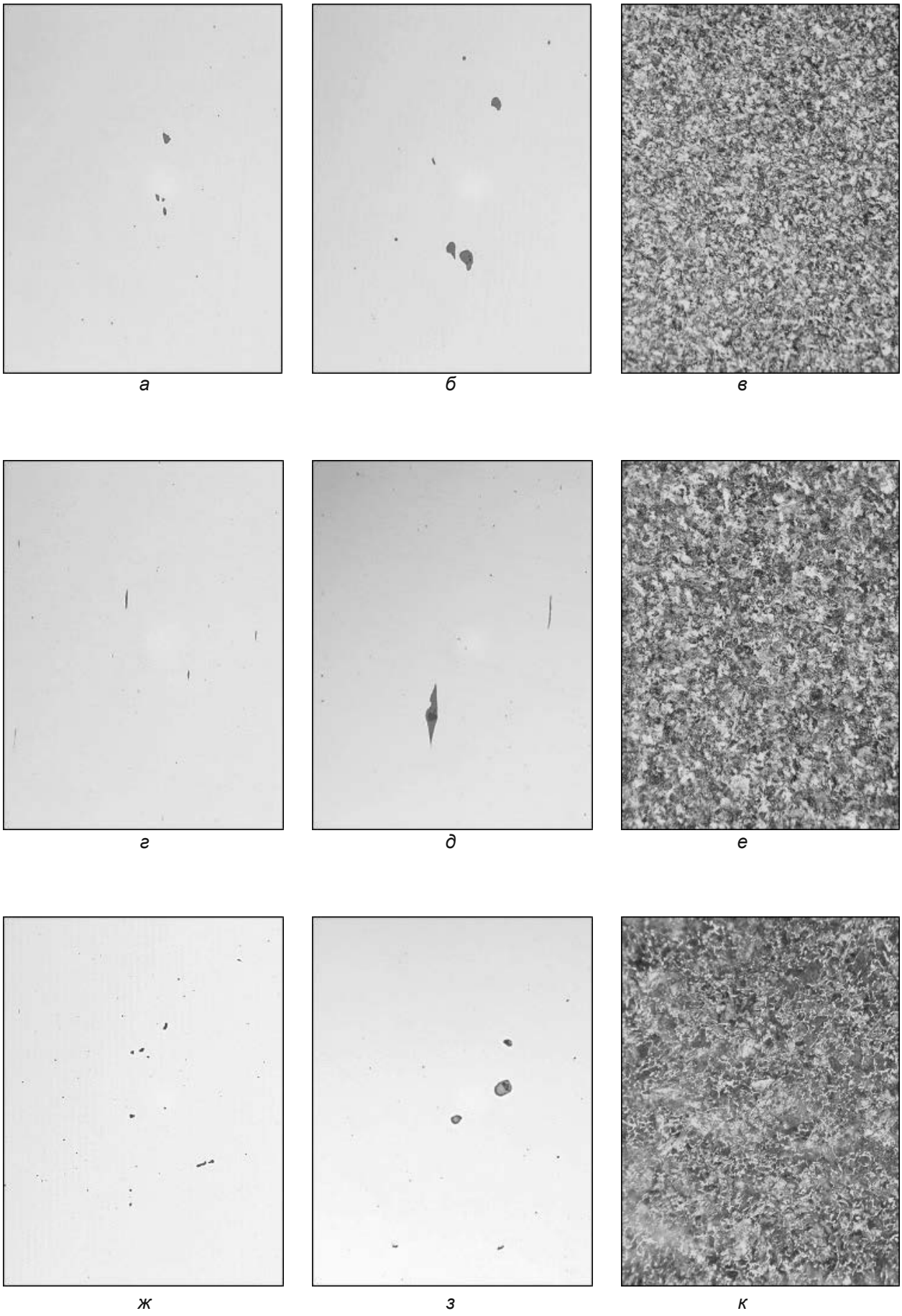


Рис. 4. Неметаллические включения в элементах цельнокатаных колес: *а, б, в* – обод; *г, д, е* – диск; *ж, з, к* – ступица; *а, г, ж* – ×100; *б, д, з* – ×400; *в, е, к* – ×50

Таблица 2

Механические свойства исследуемых железнодорожных колес, нормируемые ДСТУ ГОСТ 10791:2016

Марка/класс стали	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %	Твердость на гл. 30 мм, НВ	Ударная вязкость KCU $^{+20°C}$, Дж/см^2		Вязкость разрушения K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$
					обод	диск	
класс С	1206,3	9,2	14,4	349,3	8,5	5,11	44,3
марка 2	975,0	14,4	45,0	296,3	51,6	33,2	65,1
марка Т	1152,5	15,3	34,7	338,6	24,5	24,0	53,4

Практически во всех зарубежных и международных стандартах на железнодорожные колеса предусмотрено проведение испытаний на ударный изгиб образцов, вырезанных из обода колеса. Но, как показывают исследования различных авторов [8, 9], для конструкционных материалов и изделий из них, которые работают в условиях не только нормальных, но и при низких температурах, знания работы удара, определенное при температуре 20 °С, не может дать полной информации об их эксплуатационной надежности. Для этого необходимо проведение испытаний при низких температурах. Известно, что снижение температуры является одним из наиболее активных факторов, который оказывает влияние на переход металла из вязкого состояния в хрупкое [10, 11], и, тем самым, повышает опасность хрупкого разрушения.

В работе были проведены сравнительные исследования влияния температуры испытаний в интервале от плюс 20 до минус 60 °С на ударную вязкость образцов, вырезанных из ободьев литых и цельнокатаных железнодорожных колес (табл. 3). Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

Установлено, что при пониженных температурах литое колесо имеет значение ударной вязкости в несколько раз ниже, чем цельнокатаные колеса. Как показали исследования, выполненные в данной работе, несмотря на то, что компания Griffin Wheel и гарантирует использование своих литых колес в климатических условиях Канады, но величина их ударной вязкости даже при комнатной температуре ниже, чем у высокопрочных колес из стали марки Т (ДСТУ ГОСТ 10791:2016) при температуре минус 60 °С. То есть требования к контролируемым характеристикам колес в соответствии со стандартом AAR M-107/M-208 не позволяют гарантировать безопасную эксплуатацию колес в различных климатических условиях.

Обсуждение результатов. Аналитическая оценка и сравнительные экспериментальные исследования основных показателей надежности железнодорожных колес, изготовленных различными способами производства, показали, что литые колеса, имея меньшую стоимость и более высокие прочностные свойства, по сравнению с цельнокатаными, уступают им по другим показателям надежности. Определение сферы возможного применения литых колес требует дальнейших исследований.

Таблица 3

Ударная вязкость исследуемых железнодорожных колес при пониженной температуре

Марка/ класс стали	Ударная вязкость при пониженной температуре, Дж/см^2			
	0	-20	-40	-60
марка С	5,2	4,5	3,5	3,0
марка 2	39,3	35,3	32,7	30,1
марка Т	18,6	14,1	11,5	10,1

Выводы

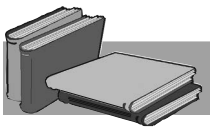
Выполненные в работе сравнительные исследования литых железнодорожных колес класса С, изготовленных по стандарту AAR M-107/M-208, и цельнокатаных колес с сталей марки 2 и Т, изготовленных по ДСТУ ГОСТ 1071:2016, показали следующие результаты:

– макроструктура литого колеса имеет выраженную структуру литого металла с присущей ей наличием трех зон (зона мелкозернистой корочки, столбчатых кристаллов и равноосных кристаллов) кристаллизации. Для цельнокатаного колеса характерна плотная однородная макроструктура;

– микроструктура металла колеса марки С неоднородна, имеет явно выраженную дендритную ликвацию химических элементов. Кроме того, в междендритном пространстве наблюдается большое число неметаллических включений (сульфидов, 3,5 балла). Неметаллические включения в металле литого колеса представляют собой вытянутые, лентообразные включения, в то время как микроструктура цельнокатаного железнодорожного колеса однородная, а неметаллические включения имеют округлую форму;

– установлено, что литые колеса (класс С по AAR M-107/M-208), имея высокие значения характеристик прочности, (временное сопротивление и твердость), а по таким важным показателям надежности как относительное сужение, относительное удлинение, ударная вязкость и вязкость разрушения значительно уступают цельнокатаным колесам (марка Т и 2 по ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при этом уровень относительного удлинения, ударной вязкости и вязкости разрушения литых колес не соответствует требованиям ДСТУ ГОСТ 10791:2016.

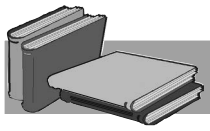
Литые железнодорожные колеса на железных дорогах Украины, очевидно, могут использоваться только на замкнутых маршрутах со специальными условиями эксплуатации. Однако, для более достоверной оценки надежности и долговечности этих изделий необходимо проведение комплекса исследований литых колес с разным уровнем прочности и содержанием углерода.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Diener, M., Ghidini, A.* Reliability and safety in railway products. Fracture mechanics on railway solid wheels. A challenge for appliers and producers. *LRS-techno: series.* 2008. Vol. 1. 118 p.
2. *Явойский В.И., Левин С.Л., Баптизманский В.И.* и др. Металлургия стали. М.: Металлургия, 1973. 816 с.
3. *Борисенко А.Ю.* Формирование структурных зон в стальных оливках. *Металознавство та термічна обробка металів.* 2014. № 2. С. 39–50.
4. *Золотаревский В.С.* Механические свойства металлов. М: Металлургия, 1983. 351 с.
5. *Мишин В.М.* Структурно-механические основы локального разрушения конструкционных сталей: монография. Пятигорск: Спецпечать, 2006. 226 с.
6. *Узлов И.Г., Моисеева Л.А., Мирошниченко Н.Г., Умеренкова Н.А., Бабаченко А.И.* Вязкость разрушения среднеуглеродистой колесной стали в различных структурных состояниях. *Сталь*. 1996. № 4. С. 51–54.
7. *Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Умеренкова Н.А., Моисеева Л.А.* Исследование влияния структурного состояния среднеуглеродистых сталей на показатели вязкости разрушения. *Сталь.* 1997. № 5. С. 57–60.
8. *Пустовой В.Н.* Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса. М: Транспорт, 1992. 256 с.
9. *Георгиев М.Н.* Вязкость малоуглеродистых сталей. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
10. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.
11. *Витцель В.И., Эдсит Н.Р.* Влияние температуры на разрушение. Разрушение. М.: Машиностроение. 1977. Т. 4. С. 68–105.

Поступила 29.05.2019



REFERENCES

1. *Diener, M., Ghidini, A.* (2008). Reliability and safety in railway products. Fracture mechanics on railway solid wheels. A challenge for appliers and producers. *LRS-techno: series.* Vol. 1, 118 p. [in English].
2. *Yavoiskiy, V.I., Levin, S.L., Baptizmanskiy, V.I.* et al. (1973). Steel metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 816 p. [in Russian].
3. *Borisenko, A.Yu.* (2014). Formation of structural zones in steel castings. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv. Metallurgy and heat treatment of metals*, no. 2, pp. 39–50 [in Russian].
4. *Zolotarevskiy, V.S.* (1983). Mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 351 p. [in Russian].
5. *Mishin, V.M.* (2006). Structural-mechanical bases of local destruction of structural steels: monograph. Pyatigorsk: Spetspechat', 226 p. [in Russian].
6. *Uzlov, I.G., Moiseeva, L.A., Miroshnichenko, N.G., Umerenkova, N.A., Babachenko, A.I.* (1996). Fracture toughness of medium carbon steel in various structural states. *Steel,* no. 4, pp. 51–54 [in Russian].
7. *Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Umerenkova, N.A., Moiseeva, L.A.* (1997). The study of the influence of the structural state of medium carbon steels on the indicators of fracture toughness. *Steel*, no. 5, pp. 57–60 [in Russian].
8. *Pustovoy, V.N.* (1992). Metal lifting machines. Destruction and prediction of residual resource. Moscow: Transport, 256 p. [in Russian].
9. *Georgiev, M.N.* (1973). Viscosity of low carbon steels. Moscow: Metallurgiya, 224 p. [in Russian].
10. *Fridman, Ya.B.* (1974). Mechanical properties of metals. Moscow: Mashinostroenie, 368 p. [in Russian].
11. *Vitsel, V.I., Edsit, N.R.* (1977). The effect of temperature on destruction. Destruction. Moscow: Mashinostroenie, Vol. 4, pp.68–105 [in Russian].

Received 29.05.2019

О.І. Бабаченко[1], д-р техн. наук, ст. наук. співр., директор, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4710-0343
Г.А. Кононенко[1], канд. техн. наук, ст. наук. співр. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7446-4105
Р.В. Подольский[2], студент, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1219-348X; **Ж.А. Дементьєва**[1], мол. наук. співр. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8863-4558; **О.А. Шпак**[1], пров. інж. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6707-0877; **О.П. Клинова**[1], пров. інж. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

[1]Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна
[2]Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Надійність залізничних коліс, виготовлених різними способами виробництва

Досліджено різні показники надійності литих і суцільнокатаних залізничних коліс. Встановлено, що литі колеса (клас С по AAR М-107/М-208), маючи високі значення характеристик міцності (тимчасовий опір і твердість), за такими важливими показниками надійності як відносне звуження, відносне подовження, ударна в'язкість і в'язкість руйнування значно поступаються суцільнокатаним колесам (марка Т і 2 по ДСТУ ГОСТ 10791:2016), при цьому рівень відносного подовження, ударної в'язкості і в'язкості руйнування литих коліс не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 10791: 2016.
Встановлено, що наявність великої кількості великих неметалевих включень несприятливої (стрічкоподібної) форми може призвести до виникнення тріщини, яка в поєднанні з литою, спрямованою структурою в перетині залізничних коліс сприяє поширенню виниклої тріщини. З позиції механіки руйнування неметалеві включення є концентраторами напружень, такими ж, як мікротріщини. При цьому максимальне напруження у вершини сульфідного включення, стрічкового або евтектики, характерних для литого колеса, довжина яких становить близько 0,05 мм, при товщині 0,005 мм, при напруженні в ободі колеса 500 МПа, може досягати величини порядку 3200 Н/мм$^{3/2}$, що перевищує допустимий рівень коефіцієнта інтенсивності напружень для цих коліс в 2 рази. Для суцільнокатаного колеса характерна щільна однорідна макроструктура; мікроструктура суцільнокатаного колеса рівномірна, а неметалеві включення мають округлу форму.
Також низькі значення ударної в'язкості, яка характеризує здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження, особливо при мінусових температурах, сприяють підвищенню ймовірності неконтрольованого руйнування виробів в процесі експлуатації. Встановлено, що при знижених температурах лите колесо має значення ударної в'язкості в кілька разів нижче, ніж суцільнокатані колеса. Визначення сфери можливого застосування литих коліс вимагає подальших досліджень.

Ключові слова

Залізничне колесо, неметалеві включення, інтенсивність напружень, механічні властивості, мікроструктура.

Summary

A.I. Babachenko[1], Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Director, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4710-0343; **A.A. Kononenko**[1], Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7446-4105; **R.V. Podolskyi**[2], student, e-mail: ronald719@rambler.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1219-348X; **Zh.A. Dementieva**[1], Junior Researcher at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8863-4558; **E.A. Shpak**[1], Lead Engineer at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6707-0877; **O.F. Klinovaya**[1], Lead Engineer at the Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

[1]Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
[2]National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Reliability of railway wheels manufactured by various manufacturing methods

Different indicators of reliability of cast and solid rolled railway wheels are investigated. It has been found that cast wheels (class C by AAR M-107/M-208), having high values of strength characteristics (temporary resistance and hardness), on such important reliability indicators as relative reduction, relative elongation, impact strength and fracture toughness considerably inferior to solid rolled railway wheels (mark T and 2 according to DSTU GOST 10791: 2016), while the level of relative elongation, impact strength and viscosity of casting wheels do not meet the requirements of DSTU GOST 10791: 2016.
It has been established, that the presence of a large number of large nonmetallic inclusions of an unfavorable (tapeworm) shape can lead to a crack, which, in combination with cast, directed structure at the intersection of railway wheels, contributes to the spread of the resulting cracks. From the position of fracture mechanics, nonmetallic inclusions are stress concentrators, such as microcracks. The maximum tension at the top of the tape or eutectic sulfide inclusion which is characteristic of a cast wheel, whose length is about 0.05 mm, at a thickness of 0.005 mm at a tension in the wheel rim of 500 MPa can reach values of about 3200 N/mm$^{3/2}$, which exceeds the allowable level of stress intensity factor for these wheels by 2 times. Solid rolled wheel is characterized by a dense homogeneous macrostructure; the microstructure of the whole wheel is uniform, and non-metallic inclusions have a rounded shape.
Also low values of impact strength, which characterizes the ability of the material to absorb mechanical energy in the process of deformation and fracture under the action of shock load, especially at minus temperatures, increase the likelihood of uncontrolled destruction of products during operation. It has been established that at lower temperatures the cast wheel has a value of impact strength a few times lower than the solid rolled wheels. Determining the scope of the possible use of cast wheels requires further research.

Keywords

Railway wheel, non-metallic inclusions, stress intensity, mechanical properties, microstructure.

УДК 621.774

А.В. Мищенко, соискатель, e-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

Состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана

Проанализировано состояние и тенденции развития производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана. Приведены современные стандарты, использующиеся на предприятиях и регламентирующие качество при производстве холоднодеформированных труб из сплавов титана. В ходе анализа проведено сравнение двух типов современных предприятий по выпуску холоднодеформированных труб из сплавов титана и выдвинуто предположение о тенденциях развития предприятий в будущем. Выявлены закономерности, а также сформулированы принципы построения маршрутов изготовления, основанные на особенностях труб из сплавов на основе титана. Показано влияние основных параметров технологии на эффективность производства и качество трубопрокатной готовой продукции. Рекомендован режим холодной пильгерной прокатки труб из сплавов на основе титана, которые способствуют уменьшению количества циклических прокаток, снижению расходного коэффициента металла, получению необходимого уровня механических свойств и достижению точности изготовляемой продукции. Рассмотрены вопросы не только точности труб, но и трубной заготовки, применяемой в производстве холоднокатаных труб из титановых сплавов. Описаны особенности разностенности для каждого типа заготовок, применяемых на предприятиях в наши дни. Приведены рекомендации по глубине удаления поверхностного слоя окалины между прокатками. Проанализировано влияние таких параметров, как дробность деформации, суммарное обжатие поперечного сечения, подача и поворот трубы в процессе прокатки, выбор типа смазки и способа ее нанесения на трубы, температура в очаге деформации, газонасыщенность поверхности и их влияния на точность труб. Даны рекомендации по этим параметрам, способствующие повышению качества труб из сплавов титана, с описанием ограничений вызванных особенностями сплавов.

Ключевые слова: *трубы, титан, сплавы, холодная прокатка труб, технология, режимы.*

Холоднокатаные трубы из сплавов на основе титана предназначены для использования в установках энергетики, химического машиностроения, авиастроения, судостроения и в других сферах промышленности. Диапазон типоразмеров в сортаменте этой продукции довольно узкий по сравнению, например, с такой же продукцией из углеродистых и легированных сталей. Требования к качеству холоднокатаных труб из титана и его сплавов, в частности стандартов AMS 4945, AMS 4946, ОСТ1 90065-72, весьма жесткие, особенно в части точности размеров по диаметру и толщине стенки [1–7]. Анализ производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана позволяет раскрыть закономерности эволюции не только этого сектора трубопрокатной промышленности, а и отрасли в целом, что весьма важно с позиций определения стратегии развития экономики государства.

Закономерности развития трубопрокатной отрасли. Анализ современных тенденций развития теории и технологии производства холоднокатаных труб [7–10] приводит к выводу, что определение некоторых технических решений привязано к конкретному временному промежутку и обстоятельствам, побудившим их разработку и реализацию в промышленной практике. Подтверждением сказанному может служить всплеск исследований в области теплой прокатки труб на станах холодной прокатки труб (ХПТ) в шестидесятых годах прошлого столетия [6], завершившийся широким внедрением этого процесса в производстве. Задача разработки и освоения технологии теплой прокатки труб возникла из-за дефицита холоднокатаных труб в государстве и необходимости немедленного увеличения объемов их производства на имеющихся мощностях трубопрокатных заводов. Усилиями ряда научных и заводских коллективов эта масштабная научно-техническая задача была решена.

Рассматриваемое, безусловно прогрессивное решение, потеряло свою актуальность и востребованность, как только сократилась потребность в трубах, изготавливаемых по технологии теплой прокатки, которая более сложная, чем классическая технология холодной прокатки. Период обозначения процесса теплой прокатки труб прогрессивным закончился. Однако результаты теоретических и экспериментальных исследований [6], полученные во время разработки и внедрения в промышленности этой технологии, сохраняют свою научную ценность и используются при решении многих научно-технических задач.

Производство холоднокатаных труб из сплавов на основе титана также развивается по подобному сценарию. Этап, когда стояла задача организовать промышленное производство холоднокатаных труб широкого сортамента из сплавов титана и любой ценой закрыть всю потребность в этой продукции, завершился. Теперь на повестке дня стоят вопросы улучшения качества и прежде всего точности таких труб, снижения себестоимости, что позволит расширить сферу их применения в различных отраслях промышленности. В этом заинтересованы одновременно и производители труб, и потребители. Трубные заводы будут иметь дополнительную прибыль от увеличения объемов производства. А потребители –

за счет расширения применения в своих изделиях труб из титановых сплавов. Накопленные в период освоения производства труб из титановых сплавов научные результаты и производственный опыт являются фундаментом, на котором будут найдены решения актуальных задач.

Предприятия по производству холоднодеформированных труб можно разделить на два типа. К первому типу относятся многопрофильные мощные заводы, способные выпускать в больших объемах горячекатаные и холоднокатаные трубы разнообразного сортамента как по маркам сталей и сплавов, так и по размерам труб. Такие предприятия были построены еще во времена СССР. Они имеют в своем составе широкий парк трубопрокатных и волочильных станов разных конструкций, нагревательных и термических печей, отделочного оборудования. Например, сортамент продукции такого завода включает трубы от минимальных размеров 3х0,1 мм до максимального размера холоднокатаных труб 126х8–18 мм. В этом ряду диаметр мелких труб изменяется через 2–3 мм, труб крупных размеров – через 6-8 мм. Отношение наружного диаметра *D* к толщине стенки труб *S* от 5 до 40. Для большей части сортамента отношение *D/S* находится в пределах 20–40.

Ко второму типу производств относятся узкопрофильные «мини-заводы» по производству труб специального назначения, в частности, из сплавов на основе титана. Эти производства возникли на базе отдельных цехов из состава разделенных на части гигантов трубной промышленности при их приватизации. Например, «Никопольского южнотрубного завода» или на новых площадках, выкупленных у обанкротившихся предприятий. Новосозданные мини-заводы в процессе определения их специализации в большинстве сохранили оборудование, необходимое для производства продукции выбранного сортамента и инфраструктуру приватизированных цехов. При этом мини-заводы доукомплектовались в разумных масштабах новыми прокатными и волочильными станами, термическими печами, травильными установками, отделочными агрегатами. В итоге были оптимизированы сортамент готовой продукции и применяемой заготовки, технологические схемы и маршруты производства труб, унифицирован рабочий инструмент холоднопрокатных и волочильных станов, численность и квалификация рабочего персонала. Результатом реализованных мероприятий явилось создание энерго- и ресурсо-малозатратных производств, обеспечивающих минимальную себестоимость продукции.

Мини-заводы специализируются в большинстве на выпуске труб двух-шести основных типоразмеров. Это позволяет им содержать сравнительно малый парк оборудования. Нередко такие заводы имеют по одному трубопрокатному стану наиболее востребованных типов (ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32); одну печь для вакуумного отжига и несколько ванн для травления, обезжиривания и промывки поверхности труб. Мини-заводы избегают больших затрат на содержание инфраструктуры, производственных площадей и помещений, штата сотрудников и т. д.

Таким образом, можно считать, что отрасль сегодня развивается, ориентируясь в основном не на количественные, а на ценовые (экономические) показатели, на рыночные критерии оптимизации производства труб. Такой подход начал активно развиваться в конце предыдущего столетия. Допустимо ожидать, что такая тенденция развития трубопрокатной промышленности будет продолжаться. Причина снижения объемов производства в 90-х годах прошлого столетия состоит в том, что внутреннему рынку Украины не нужно было большого количества труб из сплавов на основе титана. Из-за падения в разы выпуска изделий во всех отраслях и подотраслях машиностроения, авиационной, судостроительной, оборонной промышленности, а также вследствие утраты значительной части рынка соседних стран, спрос на трубы существенно сократился. Поэтому в начале двухтысячных украинские трубопрокатные заводы предприняли меры по освоению рынков европейских государств и стран дальнего зарубежья. Падение спроса на трубы на внутреннем рынке оказалось менее болезненным для тех заводов, которые переориентировались на внешние рынки, прошли сертификацию на соответствие качества изготовляемой продукции международным стандартам.

Производство труб из сплавов на основе титана является весьма трудоемким процессом и связано со многими технологическими сложностями, что часто делает их выпуск на больших заводах малорентабельным. Учитывая отмеченные преимущества узкоспециализированных трубопрокатных мини-заводов, для полного использования их потенциала необходимо решить ряд организационных и научно-технических задач, обусловленных спецификой сравнительно небольших производств. Прежде всего, в системе организации производства необходимо унифицировать технологии для использования при производстве труб различных размеров одного-двух технологических маршрутов. Такое решение позволит сократить до минимума парк рабочего инструмента прокатных и волочильных станов, в некоторых случая до 30–60 %. Частота поломок и выход оборудования из строя при рациональной загрузке станов как по объемам производства, так и по интенсивности эксплуатации снизятся.

Сортамент заготовки холоднокатаных труб из сплавов на основе титана. Высокоточные холоднокатаные трубы ответственного назначения из сплавов на основе титана ныне рациональнее изготавливать на узкоспециализированных мини-заводах, что позволит оптимизировать технологию производства, обеспечить необходимый уровень качества труб при приемлемой себестоимости продукции. Для изготовления холоднокатаных труб указанного выше сортамента используют заготовку четырех размеров: 79х18 мм, 89х15 мм, 112х16 мм и 138х22 мм. Причем из заготовки 79х18 мм изготавливают трубы размером не более 54х4–8 мм. Из заготовки 89х15 мм – трубы от 48х4–6 мм до 78х6–12 мм. Из 112х16 мм – трубы от 70х5–10 мм до 98х8–16 мм.

Из 138х22 мм – трубы от 84х6–12 мм до 126х8–18 мм. Важно подчеркнуть, что холоднокатаные трубы размерами 48х4–6 мм и 54х4–8 мм можно изготавливать из заготовки первого и второго типоразмеров. Трубы 70х5–10 и 78х6–12 мм – из заготовки второго и третьего типоразмеров. Три размера толстостенных труб (84х6–12 мм; 92х6–14 мм; 98х8–16 мм) – из заготовки третьего и четвертого типоразмеров.

Эффективность указанных маршрутов производства холоднокатаных труб из сплавов титана подтверждена многолетней практикой многопрофильных заводов большой мощности. Разработанные ранее решения вполне пригодны также для использования на мини-заводах.

Характеризуя заготовку, используемую для производства холоднокатаных труб из титановых сплавов, необходимо заострить внимание на следующих аспектах. Заготовкой служит горячедеформированная гильза-труба, полученная прокаткой на прошивных станах или прессованием. В первом случае заготовка имеет высокую (10–20 %) поперечную разностенность. При этом разностенность на 70–85 % эксцентрическая. Заготовка, полученная прессованием, имеет сравнительно небольшую поперечную разностенность (до 7,5 %). Такая заготовка имеет эксцентрический тип разностенности в поперечных сечениях по всей длине.

Чем меньше диаметр готовых труб, тем по возможности меньшего диаметра должна быть заготовка для их производства. Однако с получением заготовки малого диаметра есть трудности, связанные с тем, что горячедеформированные трубы малых размеров нередко теряют устойчивость в поперечном сечении. На внутренней поверхности труб образуется гранённость квадратной или шестигранной формы в зависимости от стана, на котором прокатывалась труба [1].

При холодной прокатке труб из титановых сплавов безоправочная деформация заготовки должна быть по возможности минимальной, чтобы исключить возникновение складок и трещин на внутренней поверхности. Минимальное обжатие по диаметру заготовки на участке безоправочной деформации при холодной прокатке труб исключает или в значительной мере уменьшает образование микроскладок и грубой шероховатости на их внутренней поверхности [4–6].

При производстве холоднокатаных труб из сплавов на основе титана толщина стенки заготовки должна существенно превышать толщину стенки готовых труб. Различие в толщинах стенки исходной заготовки и готовой трубы, по возможности, не должно быть меньше 50 %. Это требование обусловлено необходимостью интенсивной проработки исходной структуры металла для обеспечения заданных требований к механическим свойствам труб. Такое условие сложно соблюсти при производстве толстостенных труб. Поэтому иногда требуется особо толстостенная заготовка, например, с толщиной стенки до 30 мм.

Пределы допускаемых стандартами отклонений по диаметру и толщине стенки для заготовки и готовых труб из сплавов титана существенно различаются. Так, допуск по диаметру трубной заготовки, согласно ГОСТ 21945-76, составляет от -2 % до +1 %, по толщине стенки от -17 % до +15 %. Допуска, используемые для готовых труб, составляют от ±0,1 % до ±0,5 % по диаметру и от ±5 % до ±10 % по толщине стенки в зависимости от условий эксплуатации труб у потребителя. Предприятия периодически изготавливают холоднокатаные трубы из сплавов титана с так называемыми «нулевыми» допусками по диаметру и толщине стенки. Изготовление таких труб особо высокой точности требует применения дополнительных технологических операций, включая многочисленные шлифовки и травления. Также крайне сложно обеспечить высокую точность размеров на концевых участках труб.

Влияние размеров исходной заготовки на эффективность производства труб размерами 19х0,6 мм из титанового сплава рассмотрим на примере использования заготовок размерами 79х17 мм и 140х24 мм.

После обточки/расточки, заготовка меньшего диаметра будет иметь размеры 76х14 мм, заготовка большего диаметра – 137х21 мм. Чтобы получить трубу готового размера из заготовки 76х14 мм нам необходимо сделать пять циклов прокатки на станах ХПТ-55 и ХПТ-32 по маршруту: 76х14 мм → 58х8,5 мм → 45х5 мм → 34х2,6 мм → 26х1,2 мм → 19х0,6 мм. Суммарные деформации по проходам составляют 51,5 % → 52,5 % → 59,2 % → 63,5 % → 62,9 % соответственно. Расходный коэффициент металла при прокатке по такому маршруту будет составлять ~ 1,35. Для заготовки 140х24мм нам необходимо сделать семь прокаток на станах ХПТ-120, ХПТ-90, ХПТ-75, ХПТ-55, ХПТ-32 по маршруту: 137х21 мм → 114х13 мм → 95х8 мм → 80х5 мм → 63х3 мм → 42х1,9 мм → 25х1,1 мм → 19х0,6 мм. Суммарные деформации по проходам составляют 46,1 % → 47 % → 46,1 % → 52 % → 57,7 % → 65,5 % → 58 % соответственно. Расходный коэффициент металла на таком технологическом маршруте ~ 1,55.

Между прокатками необходимо выполнять дополнительные операции – термическую и другие обработки передельных труб (рисунок). При изготовлении труб из заготовки 137х21 мм необходимо выполнить два дополнительных цикла прокатки, термообработки, травления и других вспомогательных операций (см. рисунок). Это увеличивает затраты на производство, следовательно, и себестоимость готовой продукции. Различие в себестоимости будет составлять около 15–20 %.

При этом закупка партии заготовок с новым типоразмером трубы-заготовки будет стоить предприятию столько же, сколько и трубная заготовка стандартизированного большого размера. Это обусловлено тем, что заготовка закупается немерной длины, а ее стоимость определяется из расчета на килограмм.

При использовании заготовки большего размера предприятия сталкиваются с необходимостью содержания более широкого парка прокатных станов разных типов, что соответственно обусловливает дополнительные производственные затраты.

При проектировании маршрутов прокатки труб из титановых сплавов необходимо учитывать возможно-

сти уменьшения их разностенности на всех переделах производственного цикла. Для труб с высокими требованиями по точности желательно, по возможности, использовать прессованную заготовку с низким уровнем разностенности взамен горячекатаной. При этом рекомендуется обязательно внедрить механизм управления производственными запасами заготовки различных типоразмеров, необходимой для изготовления планируемых объемов труб и сортамента.

Отмеченные особенности производства холоднокатаных труб из титановых сплавов имеют системный характер, несмотря на то, что приведенная информация о размерах заготовки и готовых труб в условиях конкретного завода может быть несколько иной, в зависимости от парка станов холодной прокатки труб (ХПТ), роликовых станов (ХПТР), а также другого оборудования.

Базовая технология изготовления труб из титановых сплавов (рисунок). В общем случае заготовкой для холоднодеформированных труб служат горячекатаные или горячепрессованные гильзы диаметром 78–136 мм с толщиной стенки 8–30 мм и длиной 1,2–6 м. Перед холодной прокаткой заготовку обтачивают снаружи и растачивают внутри для удаления «альфированного» слоя и поверхностных дефектов. Затем ее разрезают на мерные длины 0,8–3 м на специализированных станках. Масса одной заготовки после этого составляет 30–200 кг. Дальше заготовку подвергают нескольким, так называемым, «циклическим операциям». На начальном этапе цикла заготовку термически обрабатывают в проходной печи или печи с вакуумной защитной атмосферой. Продолжительность отжига как заготовки, так и холоднокатаных труб, прямо пропорциональна геометрическим размерам; степени наклепа металла и уровню механических свойств, необходимых для выполнения последующих операций. Окалину с поверхности труб, которая образовалась при отжиге в печах без защитной атмосферы, удаляют травлением в растворах соляной или серной кислот. После травления трубы промывают в ваннах с горячей и холодной водой. Следующий этап – сушка труб горячим воздухом.

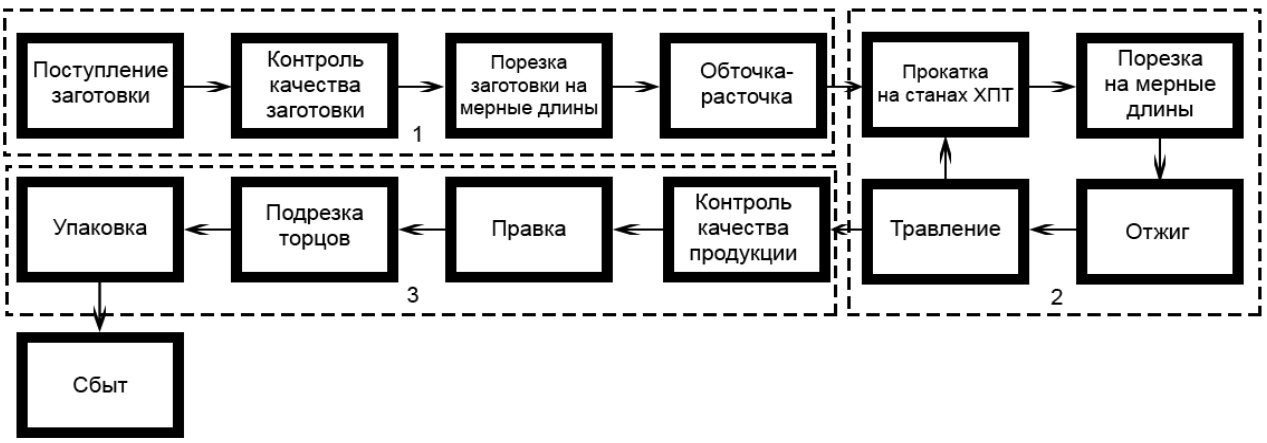
На подготовленную таким образом поверхность заготовки или передельных труб наносят смазку, назначение которой уменьшить трение на контакте металл-валок в процессе холодной прокатки и избежать налипания частиц титана на деформирующий инструмент. Современная технология холодной прокатки труб из сплавов на основе титана предполагает также подачу смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в виде эмульсии в очаг деформации, о чем будет сказано далее.

Далее трубы прокатывают на станах ХПТ на предготовый (передельный) или готовый размеры. Передельные холоднокатаные трубы повторно проходят подготовительные операции, начиная с термической обработки и заканчивая сушкой после промывки (см. рисунок). На промежуточных переделах изготовления труб нет необходимости в отжиге с длительными выдержками или при высоких температурах. Поэтому, для удешевления производства передельные трубы можно отжигать, с целью восстановления пластичности металла, в электропечах без защитной атмосферы.

На каждом переделе контролируется качество труб на предмет выявления дефектов, которые могли образоваться в процессе прокатки. При изготовлении труб особо ответственного назначения на всех промежуточных переделах рекомендуется проверять механические свойства передельных труб.

Производственный цикл повторяют столько раз, сколько необходимо для получения готовых труб заданного размера. Готовые трубы поступают на отделку. Оборудование для отделки труб на заводах стараются компоновать в виде поточных линий. Среди завершающих отделочных операций присутствуют торцовка, правка, шлифовка поверхности, струйное травление или пескоструйная обработка, пассивирование поверхности труб. После прохождения всех этапов готовые трубы направляют на маркировку и упаковку для дальнейшей транспортировки заказчику. Средний расходный коэффициент металла при производстве труб из сплавов на основе титана составляет ~1,45. Учитывая высокую стоимость титановых сплавов, актуальной задачей является поиск и реализация решений, направленных на уменьшение расходного коэффициента.

Особенности производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана. В работе



Технологическая схема производства холоднокатаных труб из сплавов на основе титана: *1* – этап подготовки заготовки к переработке; *2* – повторяющийся производственный цикл; *3* – этап отделки готовой продукции

[9] подчеркивается, что при производстве холоднокатаных труб из титановых сплавов маршруты прокатки предусматривают повышенные обжатия трубы по стенке сравнительно с маршрутами прокатки труб из углеродистых и коррозионностойких сталей. Однако даже такой подход не исключает возникновение микротрещин на внутренней поверхности холоднокатаных труб. Поэтому маршруты их производства должны по возможности минимизировать количество многоцикличных переделов на пути от заготовки до готовых труб.

При выборе маршрутов изготовления холоднокатаных труб из титановых сплавов определяющим фактором является величина допустимого относительного суммарного обжатия труб за передел. С точки зрения минимизации себестоимости производства готовых труб, желательно, чтобы деформация трубы-заготовки в каждом проходе (переделе) была максимальной. В этом случае сокращается количество циклов, а значит, существенно снижаются производственные затраты. Оптимизация величин суммарного обжатия передельных труб на каждом из этапов производства является первостепенной научной и технологической задачей.

Горячекатаная и горячепрессованная заготовка из титановых сплавов, используемая для изготовления холоднокатаных труб, имеет на поверхности под окалиной газонасыщенный слой, так называемый «альфированный», с повышенной твердостью и пониженной пластичностью. Этот поверхностный слой насыщается азотом и кислородом в основном путем диффузии. Согласно опубликованным данным [10, 11], альфированный слой состоит из густо расположенных зерен и удлиненных межзёренных включений, проникающих на значительную глубину. Обточка заготовки и травление после отжига передельных труб удаляют газонасыщенный слой с их поверхности. Использование заготовки и передельных труб, не прошедших этих процедур, приводит к возникновению микротрещин на внутренней поверхности труб [12] и дефектов на наружной поверхности.

Для предотвращения нарушений сплошности металла и возникновения трещин во время пластической деформации титановых сплавов необходимо при обточке или травлении заготовки и передельных труб удалять с их поверхности альфированный слой на полуторной-двойной глубине его сплошного залегания. В работе [11] отмечено, что снятие газонасыщенного слоя толщиной 1,2 мм с поверхности образцов достаточно для восстановления прочностных и пластических свойств сплавов ВТ-14, ВТ-3-1, ВТ-8. Для гарантированно полного восстановления прочностных и пластических свойств этих сплавов авторы названной работы рекомендуют удалять альфированный слой с включениями на глубину, в 5–6 раз превышающую его залегание. Для рассматриваемых условий это слой толщиной 2–3 мм.

На основании результатов собственных исследований применительно к производству холоднокатаных труб из сплавов на основе титана рекомендуется удалять поверхностный слой, равный ~ 3 % толщины стенки передельных труб перед последующей холодной прокаткой. Толщину удаляемого слоя с поверхности заготовки рекомендуется выбирать в пределах ~ 4–7 %. При производстве толстостенных труб стравливать необходимо более толстый слой. Для тонкостенных труб возможности утонения стенки ограничены. Этот фактор следует учитывать при построении маршрутов холодной прокатки и отжига.

Степень газонасыщения поверхности передельных труб зависит от продолжительности и температуры их отжига [10]. На газонасыщение влияют – скорость нагрева труб до температуры выдержки, температура выдержки и продолжительность пребывания металла при этой температуре, скорость охлаждения. Для каждого титанового сплава параметры отжига разные. Например, передельные трубы из сплавов на основе титана рационально отжигать при температурах 450–700 °С. Продолжительность процесса термической обработки зависит от сплава титана, геометрических размеров труб и степени деформации, которую получили трубы при прокатке.

Влияние степени деформации, температуры и продолжительности отжига после холодной прокатки на механические свойства титановых сплавов рассмотрено, например, в работах [12–17]. Экспериментально установлено, что после отжига холоднокатаных труб при температурах 600–700 °С в течение 30 мин и последующего охлаждения на воздухе пластические и прочностные свойства сплава АТ-3 восстанавливаются до исходных значений [12]. В работе [13] рекомендовано отжигать холоднокатаную ленту из титановых сплавов АТ-3 и АТ-4 при температурах 680–750 °С. Для других сплавов и различных размеров холоднокатаных труб режимы отжига должны быть скорректированы, прежде всего, с учетом степени суммарной деформации при холодной прокатке, которая за один проход может достигать 70 %.

Окалину и газонасыщенный слой удаляют с поверхности термообработанных труб травлением. Однако полностью снять этот слой, обладающий низкой способностью к пластической деформации и приводящий к возникновению складок и трещин на внутренней поверхности труб при их холодной прокатке, практически невозможно. Поэтому чем реже передельные трубы из сплавов титана подвергают отжигу, тем меньше газонасыщенность их внутренней и наружной поверхностей, а значит, слабее склонность к дефектообразованию при прокатке. Прокатанные на готовый размер трубы из титановых сплавов обычно отжигают в вакууме.

Ограничением для применения высоких суммарных обжатий при холодной прокатке труб из титановых сплавов служит их интенсивное упрочнение при деформации [18]. В процессе холодной прокатки пластичность титановых сплавов может быстро исчерпаться, если обжатия были избыточными.

Обобщая производственный опыт, следует рекомендовать, что при изготовлении холоднокатаных труб из титановых сплавов степень суммарной деформации за один передел не должна превышать 70 %. При

этом режимы холодной прокатки на станах ХПТ труб из сплавов титана (величина подачи, скорость прокатки, зависящая от количества двойных ходов клети в единицу времени, температура в очаге деформации и другие параметры процесса) должны определяться с учетом ранее описанных ограничений.

Сплавы на основе титана представляют собой дорогостоящий материал. Поэтому одним из главных критериев оптимизации маршрутов изготовления и режимов холодной прокатки труб является минимизация расходного коэффициента металла (РКМ). Общий РКМ зависит от потерь металла как на основных технологических операциях прокатки, термообработки, так и на названных выше вспомогательных переделах. Выбирая в качестве критерия оптимизации технологии производства труб из титановых сплавов расходный коэффициент металла, и, минимизируя его величину, необходимо, исходя из стоящей глобальной задачи, оптимизировать технологические режимы на каждом переделе. Причем на отдельных переделах производственного цикла нередко приходится ориентироваться на некоторые локальные критерии и ограничения.

При холодной прокатке труб из титановых сплавов технологические режимы следует рассматривать в совокупности, а не анализировать каждый параметр обособленно. Так, на температуру в очаге деформации влияют одновременно дробность деформации (число деформаций, выполняемых за двойной ход клети, за которое исходное сечение заготовки деформируется в конечное сечение трубы) и скорость прокатки (количество двойных ходов клети в единицу времени). Оба эти параметра влияют на температуру в очаге деформации прямо и косвенно через толщину смазочной пленки между контактирующими поверхностями рабочего инструмента (калибров, оправки) и прокатываемой трубы [6, 19–25], а значит – на коэффициент трения, воздействуя на энергосиловые параметры процесса прокатки, на упругую деформацию прокатной клети, калибров и оправки и др. Это, в свою очередь, влияет на геометрические размеры прокатываемых труб. С увеличением температуры в очаге деформации уменьшается вязкость технологической смазки, а значит и толщина смазочного слоя между поверхностями рабочего инструмента и прокатываемого металла. Соответственно, коэффициент трения возрастает. Причем как уже отмечено выше, температура титанового сплава в очаге деформации при холодной прокатке труб влияет на насыщение газами наружной и внутренней поверхностей, и это крайне негативно отражается на качестве прокатываемых труб, поскольку из-за потери пластичности газонасыщенного слоя сплава возрастает склонность к образованию складок и трещин на их внутренней поверхности. Если речь идет лишь о микроскладках и микротрещинах, то они удаляются струйным травлением [6, 9, 26]. Однако вследствие этой операции расходный коэффициент металла возрастает. В крайних случаях, при неудачном выборе режимов холодной прокатки, трещины и складки могут оказаться настолько глубокими, что удалить их с внутренней поверхности труб невозможно.

Анализ опубликованных теоретических и экспериментальных результатов, обобщение известного производственного опыта изготовления труб из сплавов титана, данные собственных исследований автора данной статьи приводят к выводу, что режимы деформации при холодной прокатке должны быть рационально распределены по технологическим этапам. Безусловно, решающую роль в условиях конкретного завода играет загрузка и парк прокатных станов, но некоторые однозначные решения могут быть рекомендованы для большинства предприятий. Так, на первом переделе при холодной прокатке на станах ХПТ-75 обточенной горячекатаной или горячепрессованной заготовки суммарная деформация не должна быть максимально допустимой, исходя из технологических предпосылок, и составлять менее 60 %. Величину количества двойных ходов клети в единицу времени следует устанавливать на уровне 30–60 в минуту. Ограничительными факторами являются разогрев прокатываемых труб и стабильность процесса. Температура в очаге деформации не должна превышать 250 °С, поскольку при более высоких температурах поверхность начинает активно насыщаться азотом и кислородом, что ведет к снижению механических свойств труб [10–12].

На последующих переделах при прокатке труб на станах ХПТ-55 суммарная деформация должна равняться деформации при предыдущей прокатке на станах ХПТ-75. Ограничение по температуре прокатки, как было упомянуто ранее, не должно превышать 250 °С, а количество двойных ходов клети должно находиться в диапазоне 45–75 двойных ходов в минуту. При прокатке труб на станах ХПТ-32 желательно, чтобы суммарная деформация была больше или равной деформациям на предыдущем переделе, но менее 70 %. Особо важно соблюдать эту рекомендацию при холодной прокатке труб готового размера на завершающем этапе их производства.

Согласно материалам, представленным в статье [27], при холодной прокатке особотолстостенных труб (в частности размером 55×7 мм из заготовки 93×14 мм) из нержавеющих сталей типа Х18Н9 степень деформации на участке редуцирования не должна превышать 6–8 % [24]. На основании обобщения результатов работ [26] и материалов собственных исследований производства холоднокатаных труб из сталей 09Х18Н9, Х18Н10Т, 12Х18Н9 и титановых сплавов, имеющих отношение толщины стенки к диаметру 0,05–0,12, можно заключить, что деформация на участке редуцирования не должна превышать 4–5 %.

Конкретных рекомендаций относительно выбора дробности деформации при пильгерной холодной прокатке труб из титановых сплавов в технической литературе нет. Применительно к прокатке труб из нержавеющих сталей отмечено [26], что уменьшение дробности деформации (за счет увеличения подачи) улучшает качество внутренней поверхности труб, поскольку в этом случае на участке редуцирования стенка утолщается в меньшей степени, а возникаю-

щие складки имеют меньшую глубину. Однако дробность деформации влияет на температуру прокатываемых труб и их разностенность [28]. Кроме того, проявляется влияние скорости прокатки. Следовательно, результирующий эффект этого фактора неоднозначный. Результаты исследований, выполненных автором этой статьи, позволяют рекомендовать в процессе холодной прокатки на станах ХПТ труб из титановых сплавов сравнительно высокую (45–120 двойных ходов клети) дробность деформации и устанавливать ее в зависимости от марки сплава и требований к точности размеров труб.

Вопросы точности холоднокатаных труб из сплавов на основе титана. Заготовки для производства холоднокатаных труб из титановых сплавов после обточки наружной и расточки внутренней поверхностей имеют существенную продольную (в направлении длины) и поперечную (в поперечных сечениях) разностенность. Причем, поперечная разностенность, как правило, отличается несимметричностью. Например, на одном из заводов поперечная разностенность заготовки размером 126×16 мм составляет 12–20 %. Задача снижения разностенности (особенно несимметричной) труб в процессе холодной прокатки весьма сложная и требует специального анализа и поиска путей решения. Но рассмотрение этой темы выходит за рамки данной статьи. Отметим лишь, что в процессе холодной прокатки труб с асимметрией поперечной разностенности, необходимо для ее уменьшения прокатываемые трубы проворачивать в переднем и заднем положениях прокатной клети [28]. Угол поворота должен исключать возможность периодического совпадения одной и той же ориентации сечений по отношению к калибрам и оправке. То есть, угол поворота прокатываемых труб не должен быть равным 45 или 90 градусам, при которых периодически происходит знакопеременный изгиб в поперечных сечениях одних и тех же участков трубы. С точки зрения предупреждения образования складок и трещин на внутренней поверхности прокатываемых труб, рекомендуется проворачивать их на ~ 35–40 или на ~ 50–55 градусов.

Одним из главных вопросов в технологии производства высокоточных труб из титановых сплавов является также выбор эффективных профилировок калибров и оправок станов ХПТ. Рассмотрению этого вопроса посвящено много работ, выполненных на разных этапах развития теории и технологии прокатки [3–6, 29–35 и др.]. Проанализировать результаты всех исследований, выводы и рекомендации в данной статье не представляется возможным из-за ограничений по объему текста. Поэтому отметим лишь рекомендации, не вызывающие возражений с теоретической точки зрения и подтвержденные производственной практикой.

В первую очередь подчеркнем, что профилировка рабочего инструмента (калибров, оправок) должна предусматривать минимально возможное редуцирование по диаметру прокатываемых труб в свободном состоянии, без обжатия по толщине стенки. Для этого рекомендуется проектировать зазор между внутренней поверхностью трубы – заготовки и оправкой минимальным, с учетом допусков к внутреннему диаметру заготовки. При прокатке труб из титановых сплавов на станах ХПТ-75 величину зазора между внутренней поверхностью заготовки и оправкой следует принимать в пределах 1 мм. То есть, ~ 3 % от внутреннего диаметра заготовки. На станах ХПТ-55 и ХПТ-32 этот зазор в абсолютных величинах должен быть соответственно меньшим, а в относительных – примерно на том же уровне.

Второе условие состоит в том, что профили калибров и оправки должны предусматривать максимальное обжатие прокатываемой трубы одновременно по диаметру и толщине стенки. При этом для уменьшения разностенности труб необходимо в рабочей зоне очага деформации, по возможности, увеличивать длину калибрующего участка. При сравнительно длинном калибрующем участке легче обеспечить заданную точность прокатываемых труб. Такое условие достигается в значительной мере применением оправок с криволинейной образующей профиля. Заметим, что чем длиннее калибрующий участок в очаге деформации, тем большей может быть подача в процессе холодной прокатки труб. То есть, калибровка рабочего инструмента станов ХПТ должна проектироваться с учетом планируемых режимов прокатки труб. И наоборот, если при изготовлении труб используют имеющиеся калибры и оправки, то режимы проката следует подбирать под уже выполненные калибровки.

Величину подачи при прокатке следует выбирать, исходя из соотношения *S*/*D* прокатываемых труб. Чем выше это отношение, тем большую подачу можно применять в процессе прокатки. Так при прокатке труб, характеризуемых отношением *S*/*D* ≥ 0,05, следует применять подачу 5 мм, а при *S*/D ≤ 0,05 – 3 мм.

Влияние технологической смазки и способа ее подачи в очаг деформации. При холодной прокатке труб из сплавов на основе титана эффективность технологической смазки определяется степенью снижения коэффициента трения в очаге деформации и способностью предупредить налипание частичек титана на калибры. Величины коэффициента трения при холодной прокатке труб из титановых сплавов составляют: при использовании в качестве технологической смазки хлопкового масла ~ 0,039; касторового масла ~ 0,047; пальмового масла ~ 0,055; эмульсии на основе минерального масла ~ 0,079.

Кроме состава и свойств смазки, важную роль играет метод нанесения ее на трубы перед прокаткой и непосредственно при подаче эмульсии смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в очаг деформации при прокатке. Титановые сплавы обладают высокой склонностью налипать на калибры и оправки станов ХПТ [5], этот фактор следует учитывать при выборе технологической смазки.

Теория поступления смазки в очаг деформации при холодной пильгерной прокатке труб из титановых сплавов требует существенного развития, поскольку

в рассматриваемом случае следует решать более сложную задачу, чем при листовой прокатке [19–23]. В частности, учитывать фактор двухслойной смазки. Анализ влияния технологической смазки на процесс холодной прокатки труб осложняется необходимостью принимать во внимание эффект несимметричности очага деформации в круглом калибре, вызванной разностенностью труб и упругим сплющиванием калибров и оправки. Усложняет ситуацию и то, что толщина смазочной пленки и коэффициент трения в очаге деформации непостоянные как по его длине, так и в поперечных сечениях рабочего конуса.

На современных станах холодной прокатки труб СОЖ может подаваться в очаг деформации при помощи форсунок или маслораспылителей, самотеком или под давлением. Изменяя расход СОЖ, подаваемой в очаг деформации, можно эффективно влиять на температурный режим процесса прокатки.

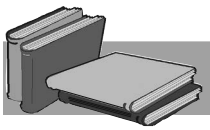
Влияние температуры. Режимы холодной прокатки труб существенно влияют на температуру в очаге деформации. Поэтому при комплексном подходе к выбору рациональной технологии производства холоднодеформированных труб температура в очаге деформации может служить критерием оптимизации процесса.

При холодной прокатке труб (без использования СОЖ) с суммарными обжатиями до 50 % температура в очаге деформации, как правило, не превышает 200 ºС, что соответствует граничной температуре для холодной прокатки титановых сплавов. Как уже отмечено выше, такая рекомендация обусловлена тем, что сплавы на основе титана восприимчивы к взаимодействию с кислородом, водородом и другими газами при нагреве [10].

Важным параметром, который влияет на эффективность производства и качество труб из титановых сплавов является распределение обжатий вдоль очага деформации, определяемое калибровкой валков и оправки. Наиболее рациональным решением является использование на предприятии одного типа калибровок. В комплексе со стремлением ограничить количество типоразмеров труб это позволяет снизить парк рабочего инструмента.

Этот вопрос настолько широкий, что требует дополнительного специального рассмотрения.

Завершая анализ, следует заключить, что изготовление холоднокатаных труб из сплавов на основе титана является высокозатратным производством. Поэтому даже небольшое удешевление технологического процесса при обеспечении требуемого уровня качества продукции способно значительно улучшить экономические показатели предприятия.

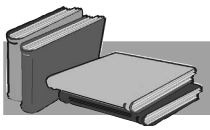


ЛИТЕРАТУРА

1. *Орро П.И., Осада Я.Е.* Производство стальных тонкостенных труб: Монография. М. Харьков: Металлургиздат, 1951. 416 с.
2. *Кофф З.А.* Холодная прокатка труб. Свердловск: Металлургиздат, 1962. 300 с.
3. *Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д.* Точность труб. М.: Металлургия, 1975. 239 с.
4. *Орлов Г.А.* Основы теории точности труб. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 105 с.
5. *Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А.* и др. Технология трубного производства: Учебник. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 638 с.
6. *Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В.* Холодная пильгерная прокатка труб. Днепропетровск: Пороги, 2005. 255 с.
7. *Кузнецов Е.Д.* Развитие теории и практики производства прецизионных стальных труб. *Системные технологии. Научные труды под ред. В.Н. Данченко*. Днепропетровск, 2005. С. 232–259.
8. *Попов М.В., Атанасов С.В., Беликов Ю.М.* Совершенствование процесса периодической прокатки труб. Днепропетровск: «Дива», 2008. 192 с.
9. Анализ основных технологий производства холоднодеформированных труб. URL: http://metalat.ru/analvtics/70-analiz-osnovnvh-tehnologiy-proizvodstva-holodnodeformirovannvh-trub.html
10. *Галицкий Б.А., Абелев М.М., Шварц Г.Л., Шевелкин Б.Н.* Титан и его сплавы. М.: Машиностроение, 1968. 340 с.
11. *Гликман Л.А., Дерябина В.И., Колгатин Н.Н.* и др. Влияние газонасыщенного слоя на прочностные и пластические свойства сплавов титана. *Сборник Титан и его сплавы. Выпуск X. Исследования титановых сплавов.* М.: АН СССР, 1963. С. 116–130.
12. *Остренко В.Я., Богоявленская Н.В., Бобриков Л.Д.* и др. Разработка технологии производства труб из титанового сплава АТ-3. *Сборник Титан и его сплавы. Выпуск X. Исследование титановых сплавов.* М.: АН СССР, 1963. С. 254–261.
13. *Шелест А.Е., Фалалеева З.С., Павлов И.М.* Изменение механических свойств сплава АТ-3 после холодной деформации и отжига. *Сборник Титан и его сплавы. Выпуск X. Исследование титановых сплавов*. М.: АН СССР, 1963. С. 245–250.
14. *Шилов В.И., Корж В.П., Одинокова Л.И.* Исследование холодной прокатки ленты из сплавов титана. *Сборник Титан и его сплавы. Выпуск X. Исследование титановых сплавов*. М.: АН СССР, 1963. С. 265–276.
15. *Остренко В.Я., Акимова Е.П., Ильвовская Л.А.* Исследование свойств титанового сплава АТ-4 применительно к условиям трубного производства. *Сборник Титан и его сплавы. Выпуск X. Исследование титановых сплавов.* М.: АН СССР, 1963. С. 357–361.

16. *Космацкий Я.И., Фокин Н.В., Филяева Е.А., Боричко Б.В.* Исследование деформационной способности трубной заготовки из титанового сплава марки ПТ-1М. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17. № 4. С. 83–91.
17. *Сериков С.В., Устинов И.К., Чуркин И.Д.* О пике пластичности титановых сплавов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение».* 2011. С. 201–209.
18. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М: Металлургия, 1973. 224 с.
19. *Мазур В.Л., Тимошенко В.И.* Теория и технология прокатки (гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности. Киев: ИД «АДЕФУкраина», 2018. 560 с.
20. *Mazur V.L., Nogovitsyn A.V.* Theory and technology of sheet rolling (Numerical Analysis and Applications). CRS Press, Taylor and Francis Group, 2019. 479 p.
21. *Мазур С.В.* Постановка задачи и закономерности течения смазки в очаге деформации при прокатке труб. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Пластична деформація металів.* Дніпропетровськ: «Системні технології». 2005. Том 8. С. 447–452.
22. *Мазур С.В.* Закономерности поступления смазки в очаг деформации при прокатке труб. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2005. № 4. С. 59–65.
23. *Мазур В.Л., Ноговицын А.В.* Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. 500 с.
24. *Кузнецов Д.Е.* Влияние трения на качество поверхности холоднодеформированных труб. *Сталь*. 2012. № 5. С. 42–46.
25. *Данченко В.Н., Фролов Я.В., Фролов В.Ф.* Холодная пильгерная прокатка труб. Днепропетровск: Пороги, 2005. 255 с.
26. *Кучеренко В.Р., Хаустов Г.И., Коробочкин И.Ю., Кекух С.Н.* Влияние редуцирования на качество внутренней поверхности труб при холодной прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1979. № 2. С. 19–20.
27. *Семенов О.А., ПляцковскийО.А., Попов М.В.* и др. О допустимой степени редуцирования при прокатке особотолстостенных труб. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 1974. № 5. С. 27–28.
28. *Пилипенко С.В.* Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ. *Сталь.* 2016. № 3. С. 32–37.
29. *Фролов Я.В., Дехтярев В.С.* Развитие методов калибровки станов ХПТ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 2. С. 52–54.
30. *Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П.* Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента. Монографія. Дніпропетровськ: Пороги», 2015. 128 с.
31. *Мищенко А.В., Григоренко В.У.* Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана на станах холодной прокатки. *Сборник «Обработка материалов давлением»*. Краматорск: 2016. № 1(42). С. 199–202.
32. *Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханин М.И.* Расчеты калибровки и усилий в станах холодной прокатки труб с применением ЭВМ: Учебное пособие. Днепропетровск: НМетАУ, 2000. 22 с.
33. *Шевакин Ю.Ф.* Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Металлургиздат, 1963. 269 с.
34. *Коробочкин И.Ю.* Некоторые вопросы калибровки инструмента станов холодной периодической прокатки труб. *Проблеми і перспективи одержання конкурентоздатної продукції в гірничо-металургійному комплексі України: тематич. зб. наук. праць.* Дніпропетровськ: НМетАУ, 2001. С. 515–528.
35. *Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П.* Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: Монография. Дніпропетровськ: Пороги, 2015. 120 с.

Поступила 05.06.2019



REFERENCES

1. *Orro, P.I., Osada, Ya. E.* (1951). Production of steel thin-walled pipes. Moscow, Khar'kov: Metallurgizdat, 416 p. [in Russian].
2. *Koff, Z.A.* (1962). Cold pipe rolling. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 300 p. [in Russian].
3. *Stoletniy, M.F., Klempert, E.D.* (1975). Precision of tubes. Moscow: Metallurgiya, 239 p. [in Russian].
4. *Orlov, G.A.* (2001). Fundamentals of the theory of pipe accuracy. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 105 p. [in Russian].
5. *Danchenko, V.N., Kolikov, A.P., Romantsev, B.A.* et al. (2002). Pipe production technology. Moscow: Intermet Inzheniring, 638 p. [in Russian].
6. *Frolov, V.F., Danchenko, V.N., Frolov, Ya.V.* (2005). Cold pilger tube rolling. Dnepropetrovsk: Porogi, 255 p. [in Russian].
7. *Kuznetsov, Ye.D.* (2005). Development of the theory and practice of production of precision steel pipes. *Sistemnye tekhnologii. Nauchnyye trudy pod red. V.N. Danchenko.* Dnepropetrovsk, pp. 232–259 [in Russian].
8. *Popov, M.V., Atanasov, S.V., Belikov, Yu.M.* (2008). Improving the process of periodic rolling tubes. Dnepropetrovsk: "Diva", 192 p. [in Russian].
9. Analysis of the main production technologies of cold-formed pipes. URL: http://metalat.ru/analvtics/70-analiz-osnovnvh-tehnologiy-proizvodstva-holodnodeformirovannvh-trub.html [in Russian].
10. *Galitskiy, B.A., Abelev, M.M., Shvarts, G.L., Shevelkin, B.N.* (1968). Titanium and its alloys. Moscow: Mashinostroenie, 340 p. [in Russian].
11. *Glikman, L.A., Deryabina, V.I., Kolgatin, N.N.* et al. (1963). The effect of the gas-saturated layer on the strength and plastic properties of titanium alloys. *Sbornik: Titan i ego splavy. Vypusk X. Issledovanie titanovykh splavov.* Moscow: AN SSSR, pp.116–130 [in Russian].

12. *Ostrenko, V.Ya., Bogoyavlenskaya, N.V., Bobrikov, L.D.* et al. (1963). Development of production technology for pipes from titanium alloy AT-3. *Sbornik: Titan i ego splavy. Vypusk X. Issledovanie titanovykh splavov.* Moscow: AN SSSR, pp. 254–261 [in Russian].
13. *Shelest, A.E., Falaleyeva, Z.S., Pavlov I.M.* (1963). Change in mechanical properties of AT-3 alloy after cold deformation and annealing. *Sbornik: Titan i ego splavy. Vypusk X. Issledovanie titanovykh splavov.* Moscow: AN SSSR, pp. 245–250 [in Russian].
14. *Shilov, V.I., Korzh, V.P., Odinokova, L.I.* (1963). Study of cold rolling strip of titanium alloys. *Sbornik: Titan i ego splavy. Vypusk X. Issledovanie titanovykh splavov.* Moscow: AN SSSR, pp.265–276 [in Russian].
15. *Ostrenko, V.Ya., Akimova, Ye.P., Il'vovskaya, L.A.* (1963). The study of the properties of titanium alloy AT-4 in relation to the conditions of pipe production. *Sbornik: Titan i ego splavy. Vypusk X. Issledovanie titanovykh splavov.* Moscow: AN SSSR, pp. 357–361 [in Russian].
16. *Kosmatskiy, Ya.I., Fokin, N.V., Filyayeva, E.A., Borichko, B.V.* (2017). Investigation of the deformation capacity of a tubular billet of titanium alloy grade PT-1M. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*. Vol. 17, no. 4, pp. 83–91 [in Russian].
17. *Serikov, S.V., Ustinov, I.K., Churkin, I.D.* (2011). About the peak plasticity of titanium alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie"*, pp. 201–209 [in Russian].
18. *Tret'yakov, A.V., Zyuzin, V.I.* (1973). Mechanical properties of metals and alloys during pressure treatment. Moscow: Metallurgiya, 224 p. [in Russian].
19. *Mazur, V.L., Timoshenko, V.I.* (2018). Theory and technology of rolling hydrodynamic effects of lubrication and surface microrelief. Kyiv: ID "ADEFUkraina", 560 p. [in Russian].
20. *Mazur V.L., Nogovitsyn A.V.* (2019). Theory and Technology of Sheet Rolling (Numerical Analysis and Applications). CRS Press, Taylor and Francis Group, 479 p [in English].
21. *Mazur, S.V.* (2005). Statement of the problem and the regularity of the lubricant flow in the deformation zone during pipe rolling. *Suchasní problemy metalurgíí, Naukoví vístí, Vol. 8, Plastichna deformatsíya metalív,* Dnípropetrovs'k: "Sistemní tekhnologíí", pp. 447–452 [in Russian].
22. *Mazur, S.V.* (2005). Patterns of receipt of lubricant in the deformation zone during pipe rolling. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 4, pp. 59–65 [in Russian].
23. *Mazur, V.L., Nogovitsyn, A.V.* (2010). Theory and technology of sheet rolling (numerical analysis and technical applications). Dnepropetrovsk: RVA "Dnípro-VAL", 500 p. [in Russian].
24. *Kuznetsov, D.E.* (2012). The influence of friction on the surface quality of cold-formed pipes. *Stal',* no. 5, pp. 42–46 [in Russian].
25. *Danchenko, V.N., Frolov, Ya.V., Frolov. V.F. (*2005). Cold pilger tube rolling. Dnepropetrovsk: Porogi, 255 p. [in Russian].
26. *Kucherenko, V.R., Khaustov, G.I., Korobochkin, I.Yu., Kekukh, S.N.* (1979). The effect of reduction on the quality of the inner surface of pipes during cold rolling. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 2, pp. 19–20 [in Russian].
27. *Semenov, O.A., Plyatskovskiy, O.A., Popov, M.V.* et al. (1974). On the permissible degree of reduction when rolling extra thick-walled pipes. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, no. 5, pp. 27–28 [in Russian].
28. *Pilipenko, S.V.* (2016). Investigation of changes in pipe pipe razgneseniya during rolling on the HPT. *Stal'*, no. 3, pp. 32–37 [in Russian].
29. *Frolov, Ya.V., Dekhtyarev, V.S.* (2009). Development of calibration methods for HPT mills. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennosť*, no. 2, pp. 52–54 [in Russian].
30. *Grigorenko, V.U., Pilipenko, S.V., Golovchenko, O.P.* (2015). Development of the method of calculating the parameters of the process of cold rolling mill rolling and instrument calibration. Dnípropetrovs'k: Porogi, 128 p. [in Ukrainian].
31. *Mishchenko, A.B., Grigorenko, V.U.* (2016). Development of a method for predicting changes in the cross-fractions with multi-pass rolling of pipes from titanium-based alloys on cold rolling mills. *Sbornik "Obrabotka materialov davleniem"*, Kramatorsk, no. 1(42), pp. 199–202 [in Russian].
32. *Grigorenko, V.U., Klimenko, P.L., Khanin, M.I.* (2000). Calibration and effort calculations in cold rolling mills using a computer. Dnepropetrovsk: NMetAU, 22 p [in Russian].
33. *Shevakin, Yu.F.* (1963). Calibration and forces in Cold Rolling. Moscow: Metallurgizdat, 269 p. [in Russian].
34. *Korobochkin, I.Yu.* (2001). Some issues calibration tool mills cold periodic rolling tubes. *Problemy í perspektyvy oderzhannya konkurentozdatnoí produktsíí v gírnicho-metalurgíynomu kompleksí Ukraíny: tematych. zb. nauk. Prats',* Dnípropetrovs'k: NMetAU, pp. 515–528 [in Russian].
35. *Grigorenko, V.U., Pilipenko, S.V., Golovchenko, O.P.* (2015). Development of the method of calculation of parameters of the process of cold rolling mill rolling and tool calibration. Dnípropetrovs'k: Porogi, 120 p. [in Ukrainian].

Received 05.06.2019

О.В. Міщенко, здобувач, e-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна

Анотація

Стан і тенденції розвитку виробництва холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану

Проаналізовано стан і тенденції розвитку виробництва холоднокатаних труб зі сплавів на основі титану. Наведено сучасні стандарти, що використовуються на підприємствах і які регламентують якість при виробництві холоднодеформованих труб зі сплавів на основі титану. В ході аналізу проведено порівняння двох типів сучасних підприємств з випуску холоднодеформованих труб зі сплавів титану і висунуто припущення про тенденції розвитку підприємств у майбутньому. Виявлено закономірності, а також сформульовано принципи побудови маршрутів виготовлення, заснованих на особливостях труб зі сплавів на основі титану. Показано вплив основних параметрів технології на ефективність виробництва і якість трубопрокатної готової продукції. Рекомендовано режим холодної пільгерної прокатки труб зі сплавів на основі титану, який сприяє зменшенню кількості циклічних прокаток, зниженню витратного коефіцієнта металу, отриманню необхідного рівня механічних властивостей і досягненню регламентованої точності продукції. Розглянуто питання не тільки точності труб, але і трубної заготовки, яка застосовується у виробництві холоднокатаних труб з титанових сплавів. Описано особливості різностінності для кожного типу заготовок, які застосовуються на підприємствах в наші дні. Наведено рекомендації щодо глибини видалення поверхневого шару окалини між прокатками. Проаналізовано вплив таких параметрів, як дрібність деформації, сумарне обтиснення поперечного перерізу, подача і поворот труби в процесі прокатки, вибір типу мастила і способу його нанесення на труби, температура в осередку деформації, газонасиченість поверхні і їх впливу на точність труб. Дано рекомендації по цих параметрах, що сприяють підвищенню якості труб зі сплавів титану з описом обмежень, викликаних особливостями сплавів.

Ключові слова *Труби, титан, сплави, холодна прокатка труб, технологія, режими.*

O.V. Mishchenko, Applicant, e-mail: mishchenkooleksii@gmail.com

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Summary

Status and trends of development of the production of cold-rolled tubes from titanium alloys

Status and trends in the development of the production of cold-rolled pipes from titanium-based alloys are analyzed. The modern standards used at the enterprises in the production of cold-formed pipes from titanium alloys are given. In the course of analyses, a comparison of the two types of modern enterprises for the production of cold-deformed pipes from titanium alloys was made and an assumption was made about the trends of development of enterprises in the future. The regularities are revealed and the principles of development of manufacturing routes based on the features of pipes from titanium-based alloys are formulated. The influence of the main parameters of the technology on the production efficiency and quality of the finished pipe products is shown. The mode of cold pilger rolling tubes of titanium-based alloys is recommended that contribute to reducing the number of cyclic rolling, reducing the expenditure ratio of the metal, obtaining the required level of mechanical properties and receiving the required level the accuracy of the manufactured products. The issues of not only the accuracy of the pipes, but also the billet used in the manufacture of cold-rolled pipes from titanium alloys are considered. The features of the wall thickness variations for each type of billet used in enterprises are described. The recommendations on the depth of removal of the surface layer of scale between rolling are given. The influence of such parameters as divisibility of deformation, total reduction of the cross-section, move and rotation of a pipe in the rolling process, the choice a lubricant and method of its application on the pipe, the temperature at a deformation zone, the gas saturation of the surface and their influence on pipe accuracy are analyzed. Recommendations on these parameters are given to improve the quality of pipes made of titanium alloys with a description of the limitations caused by the characteristics of the alloys.

Keywords *Pipes, titanium, alloys, cold rolling of pipes, technology, modes.*

УДК 669.184.152.4

С.Н. Сергеев, директор по охране труда, промышленной безопасности и экологии, e-mail: Sergey.Sergeev@dch.com.ua

ООО «Development Construction Holding» (DCH), Киев, Украина

Новый высокоэффективный энергосберегающий комплекс газоочистного оборудования для проведения регулируемой очистки выбросов от машин и агрегатов металлургических производств. Сообщение 2

Рассмотрена конструкция комплекса газоочистного оборудования, позволяющая в условиях металлургических производств оказывать активное неоднородно-избирательное воздействие на обрабатываемую среду – отводимые от металлургических плавильных агрегатов технологические газовые выбросы, для снижения расхода энергоресурсов (электроэнергии, воды) в процессе очистки технологических выбросов и капитальных затрат. Основные составляющие узлы разработанной конструкции данного комплекса представлены в виде энергоемкого регулируемого тандема установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ), сформированных тождественными структурными узлами и элементами, газоотводящие тракты которых соединены коллекторным газоходом, снабженным автоматически регулируемым запорным клапаном. В коллекторах подачи оборотной воды в аппарат мокрой газоочистки, на входах в скруббер и блок труб Вентури (ЭРТУМГ) установлены датчики расхода воды и автоматизированные регулируемые дроссельные задвижки, управление приводом которых связано с пультом управления металлургического агрегата, что обеспечивает непосредственную прямозависимую связь параметров работы газоочистки с фазой технологического цикла, в котором находится данный металлургический агрегат. В газоходах очищенного газа газоотводящих трактов (ЭРТУМГ) установлены датчики расхода очищенного газа и автоматически регулируемые запорные клапаны, управление приводом которых также связано с пультом управления металлургического агрегата, для обеспечения прямозависимой связи параметров работы газоочистки от фазы технологического цикла металлургического агрегата. Разработанный комплекс газоочистного оборудования предназначен для эксплуатации в условиях кислородно-конвертерных цехов металлургических предприятий и учитывает специфику и режимы работы существующего технологического оборудования: емкость, производительность и технологические режимы работы установленных конвертеров.

Ключевые слова: *установка мокрой газоочистки, производительность, энергосбережение, пылегазовый выброс, скруббер, эксгаустер, разрежение, датчик расхода воды, автоматизированная дроссельная задвижка, запорный клапан.*

Основной материал исследования. С целью снижения расхода энергоносителей (воды, электроэнергии), снижения капитальных затрат на реконструкцию и повышения эффективности очистки, а также для отработки рациональных конструктивных параметров и вариантов компоновки составных структурных узлов новой динамически активной комплексной системы удаления и очистки выбросов от металлургических агрегатов (конвертеров), на ЧАО «Днепровский Металлургический Завод» («ДМЗ») был разработан и реализован опытно-экспериментальный образец энергоемкого регулируемого тандема установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ).

Разработанная конструкция (рис. 1) предназначена для эксплуатации в условиях кислородно-конвертерного цеха ЧАО «ДМЗ» и учитывает специфику существующего технологического оборудования: емкость, производительность и технологические режимы работы установленных конвертеров.

Согласно рис. 1, данная объединенная комплексная система пылегазоудаления представляет собой тандем идентичных друг другу установок мокрой газоочистки (I) и (II), сформированных тождественными структурными узлами и элементами, газоотводящие тракты которых соединены коллекторным газоходом, снабженным автоматически регулируемым запорным клапаном.

Установка мокрой газоочистки (I) включает в себя: кислородный конвертер *1* с трехэлементным водоохлаждаемым кессоном *2*, аппарат мокрой газоочистки, образованным скруббером *3* и блоком труб Вентури *4*, сепарационное устройство *5*, газоход очищенного газа *6*, вторичный каплеуловитель *7* и эксгаустер (дымосос) *8*. Дымовая труба *9* и дымовой боров

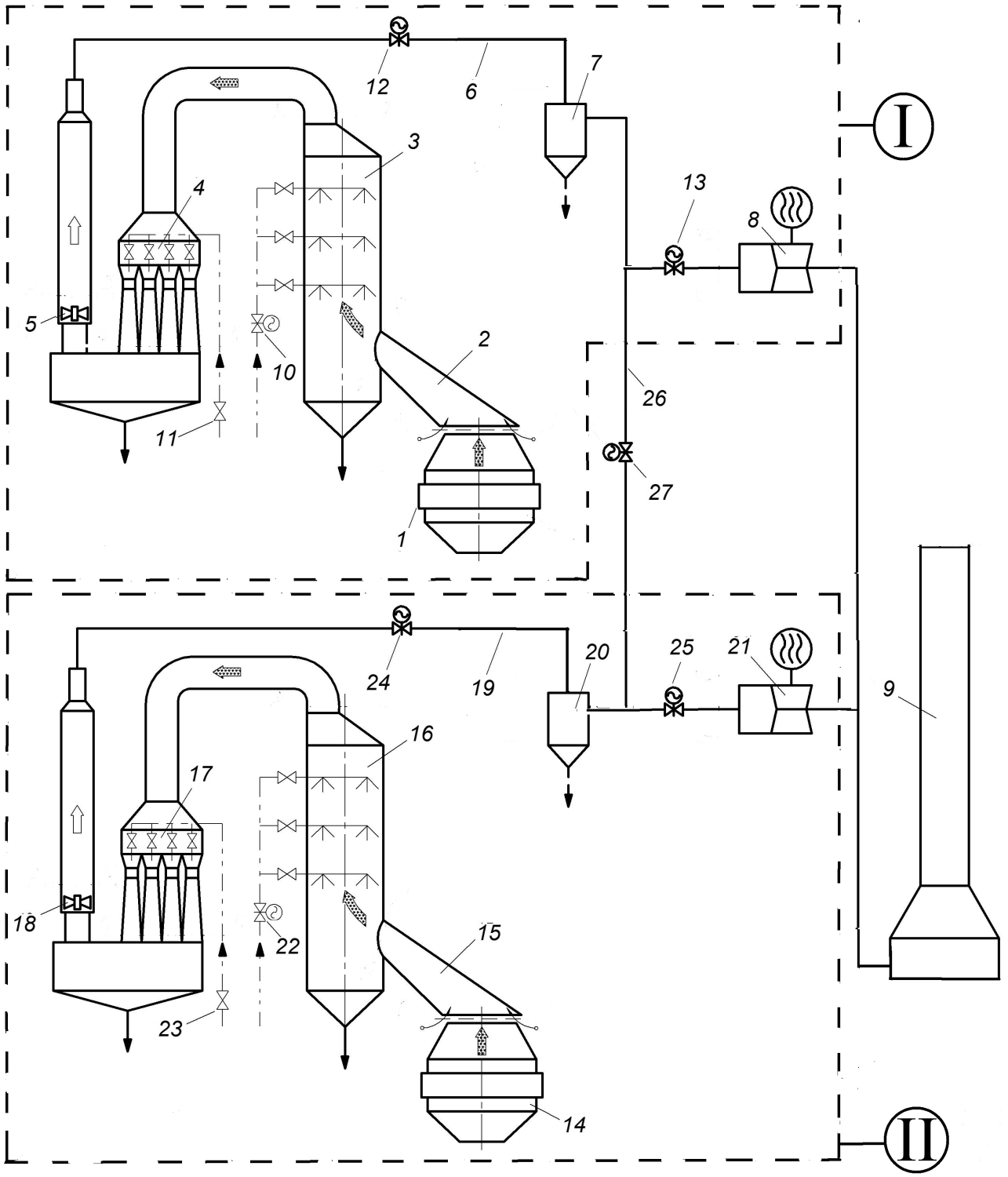


Рис. 1. Объединенная комплексная система пылегазоудаления – энергоемкий регулируемый тандем установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ): (*1, 14*) – конвертер; (*2, 15*) – кессон; (*3, 16*) – скруббер; (*4, 17*) – блок труб Вентури; (*5, 18*) – сепарационное устройство; (*6, 19*) – газоход очищенного газа; (*7, 20*) – вторичный каплеуловитель; (*8, 21*) – эксгаустер; *9* – дымовая труба; (*10, 22*) – датчики расхода воды; (*11, 23*) – автоматизированные регулируемые дроссельные задвижки; (*12, 13, 24, 25, 27*) – автоматически регулируемые запорные клапаны; *26* – общий коллекторный газоход

(на рис. 1 не показан) подсоединены через систему газоходов к эксгаустеру *8* и являются общими структурными элементами для тандема установок мокрой газоочистки. К скрубберу *3* и блоку труб Вентури *4* подсоединены два тракта подачи охлаждающе-очищающей оборотной воды.

В коллекторах подачи оборотной воды в аппарат мокрой газоочистки, конкретно на входах в скруббер *5* и блок труб Вентури *6,* установлены датчики расхода воды и автоматизированные регулируемые дроссельные задвижки *10* и *11*, управление приводом которых связано с пультом управления плавильного металлургического агрегата. В газоходе очищенного газа *6* имеются датчики расхода очищенного газа, кроме того, между сепарационным устройством *5* и вторичным каплеуловителем *7*, а также между вторичным каплеуловителем *7* и эксгаустером *8*, установлены два автоматически регулируемых запорных

клапана *12* и *13*, управление приводом которых также связано с пультом управления плавильного металлургического агрегата.

Установка мокрой газоочистки (II) включает в себя: кислородный конвертер *14* с трехэлементным водоохлаждаемым кессоном *15*, аппарат мокрой газоочистки, образованным скруббером *16* и блоком труб Вентури *17*, сепарационное устройство *18*, газоход очищенного газа *19*, вторичный каплеуловитель *20* и эксгаустер (дымосос) *21*. Дымовая труба *9* и дымовой боров (на рис. 1 не показан) подсоединены через систему газоходов к эксгаустеру *21* и являются общими структурными элементами для тандема установок мокрой газоочистки. К скрубберу *16* и блоку труб Вентури *17* подсоединены два тракта подачи охлаждающе-очищающей оборотной воды.

В коллекторах подачи оборотной воды в аппарат мокрой газоочистки, конкретно на входах в скруббер *16* и блок труб Вентури *17,* установлены датчики расхода воды и автоматизированные регулируемые дроссельные задвижки *22* и *23*, управление приводом которых связано с пультом управления плавильного металлургического агрегата. В газоходе очищенного газа *19* имеются датчики расхода очищенного газа, кроме того, между сепарационным устройством *18* и вторичным каплеуловителем *20*, а также между вторичным каплеуловителем *20* и эксгаустером *21*, установлены два автоматически регулируемых запорных клапана *24* и *25*, управление приводом которых также связано с пультом управления плавильного металлургического агрегата.

Газоход очищенного газа *6* установки мокрой газоочистки (I) соединен с газоходом очищенного газа *19* установки мокрой газоочистки (II) единым общим коллекторным газоходом *26*, в котором установлен дополнительный, автоматически регулируемый запорный клапан *27*.

ЭРТУМГ имеет непосредственную прямозависимую связь параметров отвода газов и подачи охлаждающе-очищающей воды от фазы технологического цикла, в котором находится данный плавильный металлургический агрегат.

Согласно рис. 2, регулирование и контроль объемов подачи охлаждающе-очищающей воды автоматизированными дроссельными задвижками и датчиками расхода воды, установленными в коллекторах подачи воды в скруббера и блоки труб Вентури (ЭРТУМГ), происходит следующим образом.

Если технологическое оборудование, связанное с установкой мокрой газоочистки (I) (ЭРТУМГ), находится в режиме наибольшего выделения загрязняющих веществ (продувка), тогда автоматическим регулированием объемы подачи охлаждающе-очищающей воды на газовый тракт установки (I) составляют: в скруббер в пределах 460–560 м^3/час и в блок труб Вентури 120–130 м^3/час (что необходимо для наиболее эффективной очистки отводимых газов).

При этом соответственно уменьшаются объемы подачи охлаждающе-очищающей воды в газовый тракт установки (II) (ЭРТУМГ), которая в рассматриваемый момент времени находится в режиме наименьшего выделения загрязняющих веществ (завалка, слив): в скруббер в пределах 240–340 м^3/час и в блок труб Вентури 70–90 м^3/час. Уменьшение подачи воды и соответствующая экономия возможны потому, что технологическое оборудование, связанное с этим блоком (ЭРТУГМ), находится в данном периоде в пассивной фазе, с наименьшим выделением загрязняющих веществ. Общий объем подачи охлаждающе-очищающей воды на тандем установок (I) и (II) в ЭРТУМГ практически постоянен и составляет 900 м^3/час.

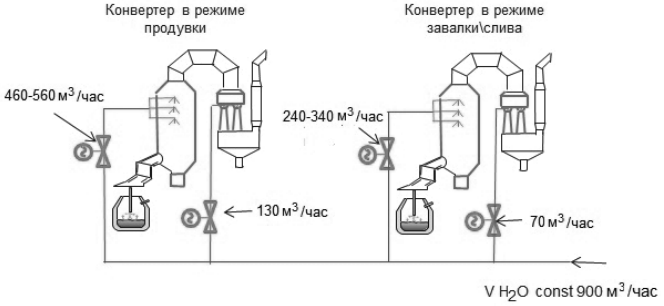


Рис. 2. Схема подачи регулируемых объемов охлаждающе-очищающей воды в составные структурные элементы (скруббера и блоки труб Вентури) газоотводящих трактов ЭРТУМГ

При этом в газоочистных установках с классической компоновкой, в основном, подача воды на систему очистки постоянна (рассчитанная на максимальный выброс загрязняющих веществ) и не регулируется в зависимости от режима работы технологического оборудования. Поэтому, для создания условий очистки выбросов, аналогичных имеющимся на ЭРТУМГ, например, схема, согласно [1], потребовалось бы на 30–40 % воды больше из-за нерегулируемой подачи воды на обе установки: скруббер 460–560 м^3/час + трубы Вентури 120–130 м^3/час.

Объединенная комплексная система газоудаления – энергоемкий регулируемый тандем установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ), согласно рис. 1, обеспечивает отвод технологических газовых выбросов от каждого из 2-х кислородных конвертеров по следующей технологической схеме.

Конвертерные газы из металлургических агрегатов – кислородных конвертеров *1* и *14*, являющихся источниками газовых выбросов, с начальной запыленностью до 60 грамм/м^3 и с температурой до 1700 °С, поступают в газоотводящие тракты энергоемкого регулируемого тандема установок мокрой газоочистки, конкретно в водоохлаждаемые газоходы очищающегося газа (кессоны), расход воды на охлаждение которых составляет до 1600 м^3/час.

За счет работы эксгаустеров 3500-15-1 (рис. 3) газоотводящих трактов ЭРТУМГ, обладающих производительностью 130–160 тыс. м^3/час каждый, в кессонах создается разрежение. При этом через постоянные зазоры между кессонами и горловинами кислородных конвертеров поступает атмосферный воздух, который смешивается с конвертерными газами и позволяет гарантированно дожечь присутствующую в конвертерных газах остаточную CO (не более 6 %) до CO_2.



Рис. 3. Эксгаустер 3500-15-1, обеспечивающий транспортировку по магистральным газоходам газоотводящих трактов (ЭРТУМГ) потоков очищающегося и очищенного газов



Рис. 4. Автоматически регулируемый запорный клапан объединенной комплексной системы пылегазоудаления – ЭРТУМГ

Конструктивно кессоны выполнены с водоохлаждаемым зазором 200 мм, расположенным между его внутренней и наружной стенкой.

Далее продукты сгорания конвертерных газов (дымовые газы) поступают в полые охладительные противоточные скруббера *3* и *16*, имеющие 3 яруса орошения, в каждом из которых установлено 7 трехдюймовых форсунок. В скрубберах *3* и *16* осуществляется охлаждение продуктов сгорания конвертерных газов диспергированной оборотной водой, и производится их предварительная очистка от наиболее крупных фракций пыли.

При этом дымовые газы охлаждаются от температуры 1400–1700 °С до температуры 80–90 °С, а оборотная вода, соответственно, нагревается до температуры 50–75 °С.

Затем, после скрубберов *3* и *16*, охлажденные и предварительно очищенные дымовые газы поступают в блоки высоконапорных труб Вентури *4* и *17*, изготовленных из стали с толщиной стенок 10 мм, с диаметром горловин 380 мм и центральным впрыском оборотной воды, где в них происходит основная стадия очистки от пыли, в том числе от мелкодисперсной. Все трубы Вентури идентичны друг другу: их диаметр пережима составляет 380 мм, диаметры входа и выхода – 870 мм, а длина равна 6119 мм.

За блоками труб Вентури от дымовых газов отделяются капли жидкости в сепарационных устройствах *5* и *18*, где капельная влага, отбрасываемая на стенки каплеуловителей, собирается в карманах завихрителей, а оттуда по трубопроводам сбрасывается в гидрозатворы пульпосборников. Затем дымовые газы проходят через вторичные каплеуловители *7* и *20*, расположенные в газоходах очищенного газа *6* и *19*, благодаря чему содержание влаги в них становится еще меньше. Далее основной объем очищенных и обезвоженных газов через эксгаустеры (дымососы) *8* и *21* нагнетается в дымовую трубу *9* диаметром 2,6 м и высотой 100 м, и с запыленностью менее 0,1 грамм/м^3 выбрасывается в атмосферу.

Производительность газоотводящих трактов по объему отводимых газов каждой из 2-х установок, формирующих (ЭРТУМГ), является переменной величиной и регулируется в ходе конвертерной плавки с помощью 5-ти автоматически регулируемых запорных клапанов *12*, *13*, *24*, *25* и *27* (рис. 4), расположенных в газоходах очищенного газа *6* и *19*, непосредственно за блоками труб Вентури *4* и *17*, перед каждым из 2-х эксгаустеров *8* и *21*, и в коллекторном газоходе *26*.

Регулирование объемов отводимых газов и разрежения в газоотводящих трактах (ЭРТУМГ), согласно рис. 1, производится следующим образом.

Согласно источнику [2], максимальные тепловыделения определяют мощность потока пылегазовых выбросов в такие периоды плавки, как кислородная продувка и расплавление, а не в периоды завалки шихты и выпуска металла.

Когда конвертер *1* находится в активной фазе плавки (в период продувки жидким кислородом), составляющей 30–50 % от общего времени цикла плавки, происходит максимальное выделение загрязняющих веществ. В этот период времени технологического процесса, система запорных клапанов *12*, *13*, *24*, *25* и *27* (ЭРТУМГ) автоматически переключается таким образом, чтобы кроме основного потока газов, отводимых через эксгаустер *8*, в коллекторном га-

зоходе *26* формировался дополнительный газовый поток. Данный поток газов формируется за счет отвода дополнительного объема очищенных дымовых газов от конвертора *1* через эксгаустер *21* установки мокрой газоочистки конвертора *14*, находящегося в пассивном периоде технологического процесса, с минимальным выделением загрязняющих веществ (завалки шихтовых материалов и слива полученного железо-углеродистого расплава).

В рассматриваемый момент времени, в объединенной комплексной системе газоудаления – (ЭРТУМГ), четыре запорных клапана *12*, *13*, *25* и *27*, расположенные в газоходе очищенных дымовых газов *6* конвертера *1*, перед каждым из 2-х эксгаустеров *8* и *21*, а также коллекторном газоходе *26* открыты на 100 %, а запорный клапан *24*, расположенный в газоходе очищенных дымовых газов *19* конвертера *14*, закрыт на 20–70 %. Соответственно в зависимости от степени перекрытия данного запорного клапана *24*, и при постоянной производительности эксгаустеров *8* и *21*, изменяется (увеличивается) объем отводимых газов и разрежения в газовом тракте конвертера *1*.

Когда конвертер *1* переходит в пассивный режим работы с минимальным выделением загрязняющих веществ, автоматизированная система запорных клапанов переключается таким образом, чтобы обеспечить отвод большего объема газов от конвертера *14*, за счет открытия клапанов *13*, *24*, *25* и *27* на газоходе от конвертера *14* на 100 % и одновременного закрытия клапана *12* от конвертера *1* на 20–70 %.

Таким образом, объединенная комплексная система газоудаления (ЭРТУМГ) начинает отводить основной объем технологических газовых выбросов через эксгаустер *21* и формирует дополнительный газовый поток, который отводится от системы газоочистки конвертера *14* через эксгаустер *8* конвертера *1*.

Для обеспечения условий отвода газов (объем, разряжение), аналогичных созданным в ЭРТУМГ, для конвертеров, находящихся в активной фазе техпроцесса, в газоочистных установках классической компоновки, с индивидуальными газоотводящими трактами от каждого металлургического агрегата, потребовалась бы установка эксгаустеров большей производительности для каждого из конвертеров. Например, эксгаустера 4500-11-1, имеющего производительность по газу 268 тыс. м^3/час и потребляемую мощность 2500 кВт/час, что влечет за собой увеличение расхода электроэнергии, а также капитальных расходов на строительство и операционных расходов при эксплуатации оборудования.

Выводы и рекомендации

Разработанная конструкция объединенной комплексной системы газоудаления для плавильных машин и агрегатов металлургических производств – энергоемкий регулируемый тандем установок мокрой газоочистки (ЭРТУМГ), обладающая повышенной «динамической активностью» и возможностью неоднородно-избирательного воздействия на обрабатываемую среду, в процессе эксплуатации в условия кислородно-конвертерного цеха ЧАО «Днепровский Металлургический Завод» позволяет:

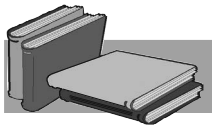
– обеспечить эффективную очистку выбросов в тандемах газоочистных установок, использующихся для очистки выбросов от циклически работающих металлургических агрегатов;

– используя комбинированное автоматическое регулирование объемов отводимых газов и разрежения в газоотводящих трактах, обеспечить с минимальными энергетическими затратами рациональное перераспределение объемов отводимых от плавильных машин и агрегатов металлургических производств, в частности кислородных конвертеров, газовых выбросов, в зависимости от фазы работы технологического агрегата и связанных с этим объемов выбросов;

– применять в газоотводящих трактах (ЭРТУМГ) эксгаустеры на 30–40 % мощности меньшей (что обеспечит экономию электроэнергии и капитальных расходов при строительстве и эксплуатации), чем при классической компоновке с индивидуальными газоотводящими, без потери общей производительности и эффективности работы системы газоудаления;

– оптимизировать расход охлаждающе-очищающей оборотной воды, предназначенной для охлаждения и очистки отходящих газов, в зависимости от фактических режимов работы, находящихся в одновременной эксплуатации 2-х металлургических агрегатов и снизить общий расход воды на очистку выбросов на 30–40 %;

– повысить эффективность очистки отходящих газов металлургических агрегатов разработанной системой мокрой газоочистки (ЭРТУМГ), без строительства новых газоочистных установок, за счет проведения реконструкции существующих систем газоочистки.

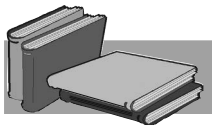


ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1232689 СССР А1, С 21 С 5/38. Способ регулирования отвода газов при выплавке металла и система для регулирования, отвода и очистки газов / Р.Ф. Грач, В.С. Гурьев, Р.К. Велецкий, Ю.С. Гавриш. № 3765919/22-02; заявл. 04.07.1984; опубл. 23.05.1986, Бюл. № 19.

2. *Швец М.Н., Гошмер В.Е., Ерохин А.В.* Система улавливания пылегазовых выбросов электропечей. *Сталь*. 1992. № 1. С. 88–90.

Поступила 25.01.2019



REFERENCES

1. *Grach, R.F., Gur'ev, V.S., Veletsky, R.K., Gavrish, Yu.S.* (1986). USSR author's certificate no. 1232689 A1, C 21 C 5/38. The method of regulating the removal of gases in the smelting of metal and a system for regulating the removal and purification of gases, no. 3765919/22-02; announced 07/04/1984; published 05/23/1986, Bulletin no. 19 [in Russian].
2. *Shvets, M.N., Goshmer, V.E., Erokhin, A.V.* (1992). The system of capturing dust and gas emissions of electric furnaces. *Steel*, no. 1, pp. 88–90 [in Russian].

Received 25.01.2019

Анотація

С.М. Сєргєєв, директор з охорони праці, промислової безпеки та екології, e-mail: Sergey.Sergeev@dch.com.ua

ТОВ «Development Construction Holding» (DCH), Київ, Україна

Новий високоефективний енергозберігаючий комплекс газоочисного устаткування для проведення регульованого очищення викидів від машин і агрегатів металургійних виробництв. Повідомлення 2

Розглянуто конструкцію комплексу газоочисного устаткування, що дозволяє в умовах металургійних виробництв справляти активний неоднорідно-вибірковий вплив на оброблюване середовище – технологічні газові викиди, що відводяться від металургійних плавильних агрегатів, для зменшення використання енергоресурсів (електроенергії, води) у процесі очистки технологічних викидів та капітальних витрат. Основні складові вузли розробленої конструкції даного комплексу представлено у вигляді енергоємного регульованого тандему установок мокрої газоочистки (ЕРТУМГ), сформованих тотожними структурними вузлами і елементами, газовідвідні тракти яких з'єднані колекторним газоходом, забезпеченим автоматично регульованим запірним клапаном. В колекторах подачі оборотної води в апарат мокрої газоочистки, на входах в скрубер і блок труб Вентурі (ЕРТУМГ) встановлено датчики витрати води і автоматизовані регульовані дросельні засувки, управління приводом яких пов'язане з пультом управління металургійного агрегату, що забезпечує безпосередній прямозалежний зв'язок параметрів роботи газоочистки з фазою технологічного циклу, в якому знаходиться даний металургійний агрегат. У газоходах очищеного газу газовідвідних трактів (ЕРТУМГ) встановлено датчики витрати очищеного газу і автоматично регульовані запірні клапани, управління приводом яких також пов'язане з пультом управління металургійного агрегату, для забезпечення прямозалежного зв'язку параметрів роботи газоочистки від фази технологічного циклу металургійного агрегату. Розроблений комплекс газоочисного устаткування призначений для експлуатації в умовах киснево-конвертерних цехів металургійних підприємств і враховує специфіку та режими роботи існуючого технологічного обладнання: ємність, продуктивність і технологічні режими роботи встановлених конвертерів.

Ключові слова

Установка мокрої газоочистки, продуктивність, енергозбереження, пилогазовий викид, скрубер, ексгаустер, розрідження, датчик витрати води, автоматизована дросельна засувка, запірний клапан.

Summary

S.N. Sergeev, Director of Health, Safety and Environmental, e-mail: Sergey.Sergeev@dch.com.ua

LLC "Development Construction Holding" (DCH), Kyiv, Ukraine

New highly efficient energy-saving gas-cleaning equipment for the regulated cleaning of emissions from machines and units of metallurgical production. Report 2

The design of the gas-cleaning equipment complex is considered, which makes it possible to produce an active non-uniform-selective effect on the environment being processed – blast furnace gas from converters and converters, under the conditions of the blast furnace and steelmaking redistribution, to reduce energy consumption (electricity, water) in the process of cleaning emissions and capital costs. The main components of the designed structure of this complex are presented in the form of energy-intensive adjustable tandem wet gas cleaning installations (ERTUMG), formed by identical structural nodes and elements, the gas exhaust paths of which are connected by a collector duct equipped with an automatically controlled shut-off valve. In the collectors of the circulating water supply to the wet gas cleaning apparatus, at the entrances to the scrubber and the Venturi tube unit (ERTUMG), water flow sensors and automated adjustable throttle valves are installed, the drive

control of which is connected to the control panel of the metallurgical unit, which provides a direct, direct dependence of the parameters of the gas cleaning operation with the phase of the technological cycle in which the metallurgical unit is located. In the flue gas ducts of the gas exhaust ducts (ERTUMG), flow sensors of the cleaned gas and automatically controlled shut-off valves are installed, the drive control of which is also connected to the control panel of the metallurgical unit, to ensure a direct dependence of the parameters of the gas cleaning operation on the phase of the technological cycle metallurgical unit. The developed complex of gas-cleaning equipment is intended for operation in the conditions of oxygen-converting shops of metallurgical enterprises and takes into account the specifics and modes of operation of the existing process equipment: capacity, performance and technological modes of operation of installed converters.

Keywords

Installation of wet gas cleaning, performance, energy saving, dust and gas emission, scrubber, exhauster, vacuum, water flow sensor, automated throttle valve, shut-off valve.

УДК 621.74

К.С. Крыжановский, канд. техн. наук, доцент, теплоэнергетический факультет
В.П. Самарай, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент, кафедра литейного производства черных и цветных металлов, инженерно-физический факультет, e-mail: samaraj@ukr.net

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

Преемственность поколений



На протяжении многих десятилетий кузницей кадров и одним из ведущих технических вузов Украины, обеспечивающих научный, технический прогресс и индустриализацию государства, являлся Киевский политехнический институт. В институте работали и учились выдающиеся ученые, прославившие ВУЗ своими научными открытиями и производственными достижениями, среди которых был ученый-металлург, академик Николай Николаевич Доброхотов (27.03.1889–15.10.1964).

В начале 30-х годов Николаю Николаевичу, высшим руководством страны, было поручено участвовать в подготовке и осуществлении проекта индустриализации СССР, что он успешно выполнил. Командированный на три года в Европу и Америку, он собрал материал и представил проект индустриального развития молодого советского государства. С его подачи и при личном участии строились металлургические заводы Днепропетровска, Запорожья, Челябинска и Свердловска, ставшие фундаментальной основой развития машиностроения и оборонного комплекса, на базе которых создавалась новая передовая наука, и росли будущие инженерные кадры, ставшие руководителями технического прогресса довоенных пятилеток. Среди них был ближайший ученик академика Доброхотова, талантливый инженер, профессор, заведующий кафедрой автоматизации КПИ Валентин Степанович Кочо.

В годы войны Николай Доброхотов, вместе с учениками, решал на Урале вопросы оборонного строительства и производства эвакуированных заводов. В частности, Валентин Степанович Кочо на Уралмаше руководил технологией производства корпусов танков Т-34 и самоходок-САУ, а в политехническом институте, в качестве доцента, готовил специалистов для металлургической промышленности.

В годы войны Валентин Степанович стал одним из крупных ведущих ученых, своими разработками и внедрениями обеспечивал фронт необходимым количеством выпускаемой бронетехники.

По окончанию войны Академик Доброхотов, вернувшись в Киев, возглавил металлургический факультет Киевского политехнического института.

Параллельно с совершенствованием сплавов и технологии литья факультет занимался вопросами измерения и автоматизации, которые разрабатывал его ученик В.С. Кочо. В 1958 году, после создания в КПИ первой на Украине кафедры автоматизации, направление автоматизации возглавил доктор технических наук, профессор В.С. Кочо.

Учитывая открытые на Украине газовые месторождения, возрождающуюся газовую добычу и промышленность, Н.Н. Доброхотов создал и возглавил первый в СССР Институт газа, который занялся вопросами транспортировки и использования природного газа в промышленности. Параллельно был создан и Институт автоматики, в задачу которого входило проведение исследований в области автоматизации промышленных технологий и эффективного использования природного газа. Научную работу в Институте автоматики, в качестве заместителя директора по науке, возглавил именно В.С. Кочо.

В сентябре 2018 года специалисты по автоматизации, ученики В.С. Кочо, отмечали 60 лет основания кафедры, а металлурги физического факультета института в 2019 году отмечают 130 лет со дня рождения своего основателя – Николая Николаевича Доброхотова.

Специалисты-металлурги и автоматчики работают во многих отраслях промышленности, своим трудом продолжая традиции старшего поколения. По уровню образования и техническому развитию Украина занимала одно из ведущих мест среди развитых стран мира. Большая заслуга в этом принадлежит всесторонне образованным выпускникам Киевского политехнического института.

В последние десятилетия наблюдается значительный спад в развитии тяжелого машиностроения





и основных отраслей народного хозяйства, в результате чего снизилась потребность промышленности в технически образованных кадрах.

Приоритет получили выпускники гуманитарных вузов, основным продуктом деятельности которых является информационный и социальный продукт, далекий от материального производства. Качество подготовки специалистов, в связи с введением образования по новой системе не повысилось, возросла ее удаленность от творческого развития личности. Однако Киевский политехник не утратил старую школу подготовки инженерных кадров и делает упор на развитие творческого отношения студентов к решению задач своей специализации, что позволяет готовить молодое поколение, способное самосовершенствоваться, генерировать и решать сложные задачи, продолжая традиции старшего поколения.

В современных сложных условиях прогрессивно настроенные творческие силы Украины начинают восстанавливать старые, разрушенные производства, тем самым повышая уровень индустриализации государства, в чем им помогают студенты и сотрудники технических вузов Украины. Одним из приоритетных направлений настоящего времени является сельское хозяйство, ахиллесовой пятой которого является сохранение выращенного урожая. Большое количество зерновых требуют, перед хранением, выполнения операции сушки, которая в больших объемах может производиться только в специальных сушильных агрегатах. Возродившийся в г. Дунаевцы Хмельницкой области Литейно-механический завод выпускает для сельхозпроизводителей сушильные установки различной производительности, что требует изготовления широкого ассортимента комплектующих, в том числе из твердых сплавов, методом литья. Существовавшее ранее литейное производство было ликвидировано и после нескольких лет бесхозного разрушения и не востребованности восстановлению не подлежало. Новое руководство завода, поддерживающее старые связи с Киевским политехническим институтом, приняло решение о восстановлении чугунно-литейного цеха, для которого было закуплено новое, современное оборудование. Для плавки чугуна была установлена низкочастотная индукционная печь мощностью 1000 кВт, производительностью 1 т/час.



В пуско-наладке системы управления запуском печи и литейного участка принимали участие представители инженерно-физического и теплоэнергетического факультетов КПИ, а также студенты 6 курса кафедры литейного производства инженерно-физического факультета – Йожеф Баги и Глеб Савощенко, находившиеся там на преддипломной практике. Помогал им формовать и проводить пробную плавку и студент-литейщик – Мамзин Сергей, уже давно классный специалист-литейщик и к тому же уважаемый участник АТО.

Молодые специалисты, под руководством ведущего специалиста завода, металлурга, выпускника КПИ, кандидата технических наук Эдуарда Николаевича Кузимовича, осваивали основы и практические навыки литейного производства. Их дипломные работы посвящены организации, проектированию литейного производства и внедрялись на заводе сразу, при их трудовом участии. Будущие инженеры принимали участие в пуско-наладке щита управления индукционной печи, запуске печи, организации рабочего участка формовки изделий, подготовке и выпуске первой партии изделий. Влившись в трудовой коллектив, они почувствовали свою сопричастность к общему делу трудового коллектива. На фотографиях вы можете видеть то, что пытается возродить молодая смена старшего поколения. В таких молодых специалистах нуждается наша страна. Они могут служить примером тем, кто находится на распутье, и



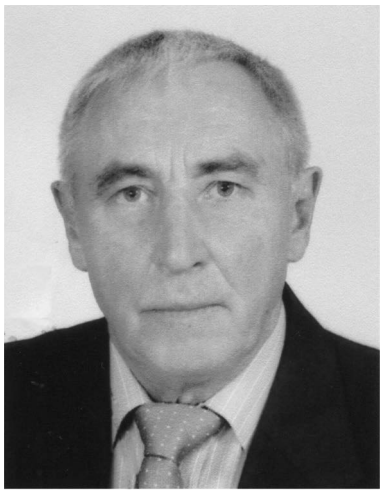




еще не выбрал свой жизненный путь. Если вы хотите учиться и являетесь примером в учебе для своих сверстников, поступайте в Киевский политехнический институт.

По его окончании вы станете востребованным специалистом и надежной опорой возрождающейся промышленности нашего государства. На вас – молодых студентах, аспирантах, специалистах, возлагается эта высокая обязанность и связываются надежды украинского народа.

75 ЛЕТ



НАРИВСКОМУ Анатолию Васильевичу

13 апреля 2019 г. исполняется 75 лет известному ученому-материаловеду, доктору технических наук, члену-корреспонденту НАН Украины, директору Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины **Наривскому Анатолию Васильевичу**. Родился он в с. Выползово, Белгородской области (Россия). После окончания в 1967 г. Харьковского политехнического института получил квалификацию инженера-механика по специальности «Машины и технологии литейного производства» и был направлен на работу в Институт проблем литья (с 1996 г. – Физико-технологический институт металлов и сплавов) НАН Украины. В этом Институте он работал на инженерных должностях, старшим, ведущим и главным научным сотрудником, заведующим отделом, заместителем директора по научной работе, с 2017 г. – директором Института. В 1970 г. поступил в аспирантуру, в 1977 г. защитил кандидатскую, в 2006 г. – докторскую диссертации по специальности «Литейное производство». По этой специальности в 1993 г. ВАК присвоила ему звание старшего научного сотрудника. В 2018 г. Анатолий Васильевич избран членом-корреспондентом НАН Украины.

Научная деятельность А.В. Наривского направлена на создание эффективных методов воздействия на металлические расплавы с целью повышения качества литых изделий. Он предложил способы обработки сплавов заглубленной в расплав плазменной струей и методики исследования основных параметров этого процесса. Под его руководством изучены температурные и гидродинамические параметры реакционной зоны плазменной струи, истекающей в металлический расплав. Исследовано влияние плазменных воздействий на: массообменные и физико-химические процессы в жидком металле; строение расплава; структуру и прочностные характеристики закристаллизованных сплавов. Результаты этих исследований позволили разработать экологически чистые процессы глубинной обработки расплавов плазмореагентными средами в атмосферных условиях и вакууме.

Подтверждением высокого научно-технического уровня и практического значения работ, выполненных А.В. Наривским, стало присуждение ему в 2001 г. премии им. З.И. Некрасова НАН Украины, а в 2008 г. – Государственной премии Украины в области науки и техники. В 2009 г. он отмечен грамотой Верховного Совета Украины. Им опубликовано более 160 научных трудов, в числе которых 2 монографии, 45 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

А.В. Наривский является руководителем научных проектов в рамках государственных, академических и европейских программ. Определяет перспективы и направления проведения фундаментальных и прикладных исследований в Институте. Является заместителем председателя Ученого совета Института, членом Специализированного совета по присуждению ученых степеней кандидата и доктора наук. Активно сотрудничает с научно-техническими организациями Китая, Вьетнама, Польши, Индии, Ирана и других стран, выступает с научными докладами на национальных и международных конференциях.

Дирекция, коллектив Института и редакция журнала «Металл и литье Украины» искренне поздравляют Анатолия Васильевича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, творческих успехов, личного счастья и всего самого светлого в жизни!



80 ЛЕТ

ДУБОДЕЛОВУ Виктору Ивановичу

16 апреля 2019 г. исполняется 80 лет известному ученому в области материаловедения, технологии металлов и прикладной магнитной гидродинамики, академику НАН Украины, доктору технических наук, профессору, заведующему отделом ФТИМС НАН Украины **Виктору Ивановичу Дубоделову**.

По окончании в 1962 г. Харьковского политехнического института В.И. Дубоделов начал свою трудовую деятельность в Институте литейного производства (сейчас ФТИМС НАН Украины). В это время в Институте под руководством проф. В.П. Полищука группой молодых талантливых специалистов, среди которых был и В.И. Дубоделов, было основано новое научное направление в материаловедении, связанное с изучением физических механизмов, и установлением неизвестных ранее закономерностей получения металлических материалов при наложении электромагнитных полей и использовании магнитогидродинамических (МГД) явлений в комплексе с другими физико-химическими воздействиями на металлические системы в жидком состоянии, в процессе фазовых переходов, при формообразовании и кристаллизации литых заготовок. Эти работы послужили толчком к созданию признанных в Украине и мире научной школы по магнитодинамический обработке металлов и отдела магнитной гидродинамики ФТИМС НАН Украины. В.И. Дубоделов за годы работы в Институте защитил кандидатскую и докторскую диссертации, заведовал лабораторией, был заместителем директора по научной работе, в 1991 г. возглавил научную школу и отдел, обеспечив их дальнейшее развитие, в частности, благодаря успешному выполнению сложных фундаментальных и прикладных научных исследований в рамках государственных, академических и международных программ и проектов.

При непосредственном участии и под руководством В.И. Дубоделова были созданы и внедрены оригинальные МГД-технологии и оборудование для ввода жидких алюминия и ферросплавов в сталь, осуществления комплексной термосиловой и реагентной внепечной обработки литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, в том числе высокопрочных многокомпонентных алюминиевых сплавов для нужд высокотехнологичной техники, в частности, авиакосмического комплекса, медных сплавов специального назначения, разработана концепция революционных МГД-технологий получения нового поколения композиционных материалов, впервые в мире создан электромагнитный миксер-дозатор стали, разработаны предпосылки для применения магнитодинамических устройств при непрерывной разливке металлов и сплавов.

В.И. Дубоделов также обеспечил масштабную коммерциализацию и внедрение созданных разработок на ведущих предприятиях в Украине и за рубежом (только за последние годы – в Нидерландах, Республике Корея, Великобритании).

Научная деятельность В.И. Дубоделова отмечена присвоением ему Почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (2017 г.), присуждением Государственной премии Украины в области науки и техники (2008 г.), Премии имени З.И. Некрасова НАН Украины (2005 г.).

Результаты научной деятельности В.И. Дубоделова отражены более чем в 450 научных публикациях, в том числе 3 монографиях, одном открытии, многочисленных патентах Украины и ведущих стран мира. Он является неизменным участником крупнейших международных конференций по электромагнитной обработке материалов и фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамике.

В.И. Дубоделов подготовил 3 докторов и 8 кандидатов наук, преподавал и разрабатывал учебные курсы и программы для НТУУ «КПИ». Он выполняет большой объем научно-организационной работы, являясь председателем ученого совета ФТИМС НАН Украины и специализированного совета по присуждению ученых степеней при ФТИМС НАН Украины, членом секции Комитета по Государственным премиям Украины в области науки и техники, заместителем председателя Межведомственного научно-технического совета Украины по проблемам внепечной обработки и непрерывной разливки стали, членом редколлегии журналов «Процессы литья» и «Металл и литье Украины».

Научная общественность и редакционная коллегия журнала «Металл и литье Украины» сердечно поздравляют Виктора Ивановича Дубоделова с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, счастья и новых творческих успехов!

Конференции в 2019 году

Конференція молодих вчених та спеціалістів «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МАШИНОБУДУВАННЯ» (присвячена 120-річчю з дня народження академіка НАН України Філіппова Анатолія Петровича)

15.04 2019

м. Харків, Україна, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

E-mail: igbaranov.84@gmail.com

XII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ НОВІТНІХ ФІЗИКО-МАТЕРІАЛОЗНАВЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО КОНСТРУЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ»

18 – 19.04 2019

м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інженерно-фізичний факультет, кафедра фізики металів

E-mail: conference.kpm@meta.ua

XVII Всеукраїнська науково-практична конференція «СПЕЦІАЛЬНА МЕТАЛУРГІЯ: ВЧОРА, СЬОГОДНІ, ЗАВТРА»

23.04 2019

м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Website: http://smytt-metal.kpi.ua/SMYTT-17

Конференція «ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ – ФМІЕ-2019» (присвячена 70-річчю від дня народження академіка НАН України Анатолія Петровича Шпака)

13 – 15.05 2019

м. Київ, Україна, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

Website: https://www.fmie.space/
E-mail: fmie_2019@imp.kiev.ua

Всеукраїнська конференція з міжнародною участю «ХІМІЯ, ФІЗИКА ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНІ» і семінар «СИНТЕЗ ТА ЗАСТОСУВАННЯ БІОСУМІСНИХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТАЛІВ»

15 – 17.05 2019

м. Київ, Україна, Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка

E-mail: icvmtt34@gmail.com

Міжнародна науково-практична конференція «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ»

20 – 25.05 2019

м. Івано-Франківьк – Яремче, Україна

Website: http://itcm.comp-sc.if.ua
E-mail: yurii.iliash@pu.if.ua

VII Міжнародна конференція «КОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ: СУЧАСНЕ ТА МАЙБУТНЄ» (присвячується 65-річчю з дня заснування Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне»)

21 – 24.05 2019

м. Дніпро, Україна, ДП «КБ «Південне»

Website: https://dpukrconfiaa.org/
E-mail: info@dpukrconfiaa.org

XV Міжнародна науково-практична конференція «ЛИТВО. МЕТАЛУРГІЯ. 2019» м. Запоріжжя, Україна, Виставковий центр «Козак-палац» *E-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua; berlizeva.tatyana@gmail.com*	21 – 23.05 2019
XI Міжнародна науково-технічна конференція «НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ-2019» м. Київ, Україна, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інженерно-фізичний факультет, ауд. 203-9 *Website: http://metalcasting.kpi.ua/2019* *E-mail: metalcasting@ukr.net*	30 – 31.05 2019
Международная конференция «МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И 3-D ТЕХНОЛОГИЙ» г. Киев, Украина, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины *Website: http://www.pwi-scientists.com/rus/welding-consumables_2019* *E-mail: journal@paton.kiev.ua; romanova@paton.kiev.ua*	4 – 5.06 2019
V Международный научный конгресс «ИННОВАЦИИ 2019» г. Варна, Болгария *Website: http://www.innova-eng.eu* *E-mail: office@innova-eng.eu*	19 – 22.06 2019
IV Международная научная конференция "Industry 4.0" г. Бургас, Болгария *Website: http://www.industry-4.eu* *E-mail: office@industry-4.eu*	24 – 27.06 2019
IX Международная конференция «ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ» г. Одесса, Украина, отель «Аркадия» *Website: http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019* *E-mail: journal@paton.kiev.ua; romanova@paton.kiev.ua; patonpublishinghouse@gmail.com*	9 – 13.09 2019
VII Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ І ОБЛАДНАННЯ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ» м. Краматорськ, Україна *Website: http://www.dgma.donetsk.ua/tolpkonf-2019.html* *E-mail: tolp.dgma@gmail.com*	14 – 18.10 2019
II International Conference of Casting and Materials Engineering ICCME 2019 "Materials and Technologies for Automotive Industry" Krakow, Poland, Faculty of Foundry Engineering *Website: www.foundry.agh.edu.pl/iccme-2019/* *E-mail: konferencjawo@agh.edu.pl*	15.11 2019

ЗМІСТ

ПРОЦЕСИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ

Верзілов О.П.
Фізичне моделювання асиметричного витікання металу у кристалізатор слябової машини безперервного лиття заготовок. 5

Писарський С.М., Смірнов О.М.
Дослідження сучасних уявлень про природу формування відкладень в вогнетривах при розливанні сталі. Повідомлення 2. 10

ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА І ПРОЦЕСИ ЛИТТЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Пономаренко О.І., Косенко О.П., Швець М.В., Євтушенко С.Д.
Застосування комп'ютерно-інтегрованного проєктування для нетехнологічних виливків шахтного обладнання. 18

Гнатуш В.А., Дорошенко В.С.
Зростання виробництва алюмінієвого лиття на початку XXI століття. 25

СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ЛИТТЯ

Лук'яненко І.В.
Дослідження технологічних параметрів процесу отримання чавунних виливків для роботи в умовах зношування. 34

ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Василев Я.Д., Замогильний Р.О.
Вплив особливостей контактної взаємодії тонкої штаби з валками на параметри початкового налаштування робочої кліті і найменшу товщину штаби, що прокатується. 41

Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Дементьєва Ж.А., Шпак О.А., Клинова О.П.
Надійність залізничних коліс, виготовлених різними способами виробництва. 48

Міщенко О.В.
Стан і тенденції розвитку виробництва холодної прокатки труб зі сплавів на основі титану 58

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ МАШИН МЕТАЛУРГІЙНОГО ТА ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сєргєєв С.М.
Новий високоефективний енергозберігаючий комплекс газоочисного устаткування для проведення регульованого очищення викидів від машин і агрегатів металургійних виробництв. Повідомлення 2. . . 69

Крижановський К.С., Самарай В.П.
Спадкоємство поколінь. 76

Вітаємо!
75 років Нарівському Анатолію Васильовичу 79

Вітаємо!
80 років Дубоделову Віктору Івановичу 80

Конференції у 2019 році. 81

CONTENTS

CONTINUOUS CASTING OF STEEL

Verzilov A.P.
Physical modeling of the asymmetric flow of the metal in the mold slab of continuous casting machine. . . 5

Pisarskii S.N., Smirnov A.N.
The study of modern concepts about the nature of deposits in refractories during casting of steel. Report 2. . 10

TECHNOLOGIES AND PROCESSES OF CASTING METALS AND ALLOYS

Ponomarenko O.I., Kosenko O.P., Shvets M.V., Yevtushenko S.D.
Application of computer-integrated design for non-technological castings of mine equipment. 18

Gnatush V.A., Doroshenko V.S.
The growth of aluminum casting production at the beginning of the XXI century. 25

SPECIAL CASTING TECHNIQUES

Lukianenko I.V.
Research of technological parameters of the process of iron castings obtaining for work in wearing conditions. 34

METAL PROCESSING BY DEFORMATION

Vasilev Ya.D., Zamogilny R.A.
Influence of the special features of contact interaction of the thin strip with rolls on the parameters of the initial setting of the working stand and the least thickness of the rolled strip. 41

Babachenko A.I., Kononenko A.A., Podolskyi R.V., Dementieva Zh.A., Shpak E.A., Klinovaya O.F.
Reliability of railway wheels manufactured by various manufacturing methods. 48

Mishchenko O.V.
Status and trends of development of the production of cold-rolled tubes from titanium alloys 58

OPERATION AND DESIGN OF METALLURGICAL AND FOUNDRY MACHINES

Sergeev S.N.
New highly efficient energy-saving gas-cleaning equipment for the regulated cleaning of emissions from machines and units of metallurgical production. Report 2. 69

Kryzhanovskiy K.S., Samaray V.P.
Continuity of generations. 76

Congratulations!
Narivskiy Anatoliy Vasilevich is 75 years old 79

Congratulations!
Dubodelov Viktor Ivanovich is 80 years old 80

Conferences in 2019. 81

Організаційний комітет

Фесенко А. М.	перший проректор ДДМА, канд. техн. наук, проф. ДДМА – голова
Турчанін М. А.	проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків, д-р хім. наук, проф. – співголова
Агравал П. Г	зав. кафедри ТОЛВ ДДМА, канд. хім. наук, доц. – заст. голови
Корсун В. А.	асистент кафедри ТОЛВ ДДМА – вчений секретар
Федоров М. М.	доцент кафедри ТОЛВ ДДМА, канд. техн. наук – член оргкомітету
Лапченко О. В.	доцент кафедри ТОЛВ ДДМА, канд. техн. наук – член оргкомітету
Приходько О. В.	ст. викл. кафедри ТОЛВ ДДМА – член оргкомітету

Програмний комітет

Авдєєнко А. П.	зав. кафедри ХіОП ДДМА, канд. хім. наук, проф.
Агравал П. Г	зав. кафедри ТОЛВ ДДМА, канд. хім. наук, доц.
Алієв І. С.	зав. кафедри ОМТ ДДМА, д-р техн. наук, проф.
Бубликов В. Б.	зав. відділу високоміцних спеціальних чавунів ФТІМС НАНУ, д-р техн. наук
Бурбелко Андрій	проф. AGH University of Science and Technology (м. Краків, Польща)
Бурдін Д.М.	директор ТОВ «Укрфаворіт»
Бистров Ю. О.	виконавчий директор АЛУ
Верховлюк А. М.	директор ФТІМС НАНУ, зав. відділу фізико-хімії сплавів, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.
Гринь О. Г.	декан факультету інтегрованих технологій і обладнання ДДМА, канд. техн. наук, доц.
Дашич Предраг	проф. Вищої технічної школи (м. Трстенець, Сербія)
Дібров І. А.	президент Російської асоціації ливарників (м. Москва, Російська Федерація), д-р техн. наук, проф.
Злигорєв В.М.	головний металург ПрАТ «НКМЗ»
Каргінов В. П.	віце-президент АЛУ, керівник групи «Союз», головний експерт
Кассов В. Д.	зав. кафедри ПТМ ДДМА, д-р техн. наук, проф.
Клименко С. І.	директор Департаменту ливарного виробництва, канд. техн. наук
Ковальов В. Д.	ректор ДДМА, д-р техн. наук, проф.
Козлов А. Н.	начальник технічного відділу ливарного виробництва ПАТ «ЕМСС»
Луньов В. В.	зав. кафедри МТЛВ ЗНТУ, д-р техн. наук, проф.
Лисенко Т.В.	зав. кафедри ТУЛП ОНПУ, д-р техн. наук, проф.
Марукович Є. І.	директор Інституту технології металів Національної академії наук Республіки Білорусь, академік НАН Республіки Білорусь, д-р техн. наук, проф..
Могилатенко В. Г.	проф. кафедри ЛВЧКМ НТУУ «КПІ», д-р техн. наук, проф.
Найдек В. Л.	почесний директор, радник дирекції ФТІМС НАНУ, академік НАНУ, д-р техн. наук, проф.
Нарівський А.В.	директор ФТІМС НАН України, д-р техн. наук, проф.
Пономаренко О. І.	віце-президент АЛУ, проф. кафедри ЛВ НТУ «ХПІ», д-р техн. наук, проф.
Рюдигер Бер	зав. кафедри ЛВ і ОМТ Університету ім. Отто фон Геріке (м. Магдебург, Німеччина), д-р техн. наук, проф.
Савенок А. М.	ген. директор РУП «БМЗ», голова асоціації ливарників і металургів Республіки Білорусь (м. Мінськ)
Селютін О. А.	технічний директор ПАТ «ЕМСС»
Скудар Г. М.	Герой України, президент ПрАТ «НКМЗ», д-р екон. наук, проф.
Суков Г. С.	голова правління, генеральний директор ПрАТ «НКМЗ», канд. екон. наук
Турчанін М. А.	проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків, д-р хім. наук, проф.
Фесенко А. М.	перший проректор ДДМА, канд. техн. наук, доц.
Фесенко М. А.	доцент кафедри ЛВЧКМ НТУУ«КПІ», канд. техн. наук, доц.
Хричиков В. Є.	зав. кафедри ЛВ НМетАУ, д-р техн. наук, проф.
Шинський О. Й.	заст. директора ФТІМС НАНУ, президент АЛУ, д-р техн. наук, проф.
Ефенберг Гюнтер	директор Materials Science International (м. Штутгарт, Німеччина), д-р
Ямшинський М. М.	зав. кафедри ЛВЧКМ НТУУ «КПІ», канд. техн. наук, доц.



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА),
84313, Україна, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72

Розрахунковий рахунок для перерахування організаційного внеску

Банк: ДКСУ м. Київ УДКСУ у м Краматорськ Донецької обл.
ОКПО 02070789 МФО 820172 р/р 31255249105870
У платіжному дорученні (квитанції) в графі призначення платежу вказати 25010100 за видання матеріалів конференції (П.І.Б. платника)

Довідки з організаційних питань за телефонами:

оргкомітету: **+(38-0626)-41-46-86**
+38-066-190-82-68

Довідки з питань оформлення тез доповідей:

каф. ТОЛВ ДДМА **(38-0626) 41-46-86**
моб. тел. **+38-099-645-53-16**
+38-066-190-82-68
+38-066-453-55-50
факс **(38-0626) 41-63-15**
e-mail: tolp@dgma.donetsk.ua
tolp.dgma@gmail.com

Міністерство освіти і науки України
Асоціація ливарників України
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України
Донбаська державна машинобудівна академія
ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»
ПАТ «Енергомашспецсталь»
ТОВ «Укрфаворіт»

Інформаційне повідомлення

VII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ І ОБЛАДНАННЯ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ »

14 – 18 жовтня 2019 року



УКРАЇНА,

КРАМАТОРСЬК, 2019

Шановні колеги!

На базі кафедри технологій та обладнання ливарного виробництва (ТОЛВ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА), м. Краматорськ, Україна 14 – 18 жовтня 2019 року проводиться

VII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ І ОБЛАДНАННЯ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ»

Робота конференції буде проходити за такими напрямами:

- ✓ ***Прогресивні технологічні процеси отримання виливків з металевих і неметалевих матеріалів;***
- ✓ ***Перспективні формувальні матеріали і суміші;***
- ✓ ***Теорія структуроутворення і кристалізації сплавів;***
- ✓ ***Перспективні технології модифікування, легування і зовнішніх впливів на рідкий і кристалізовуваний метал;***
- ✓ ***Фізико-хімічні основи отримання металів і сплавів;***
- ✓ ***Математичне, фізичне, імітаційне моделювання, комп'ютерні та інформаційні технології в ливарному виробництві;***
- ✓ ***Механізація і автоматизація процесів ливарного виробництва;***
- ✓ ***Перспективні методи контролю якості литва;***
- ✓ ***Термічне оброблення литих виробів;***
- ✓ ***Менеджмент і економіка ливарного виробництва;***
- ✓ ***Екологічні проблеми ливарного виробництва;***
- ✓ ***Підготовка, перепідготовка та підвищення кваліфікації кадрів для ливарної галузі та суміжних галузей.***

Програмою конференції планується:

проведення екскурсій по ДДМА, на ПрАТ «НКМЗ», ПАТ «ЕМСС» (м. Краматорськ), до Свято-Успенської Лаври (м. Святогірськ);

детальна презентація сучасних матеріалів і обладнання, які постачає генеральний спонсор конференції – компанія Укрфаворіт.

Під час конференції учасники матимуть можливість виставити свої демонстраційні матеріали, рекламні проспекти, стенди, експонати, нові опубліковані наукові праці та ін.

Запрошуємо Вас взяти участь у роботі конференції та виступити з доповідями.

Для участі в конференції необхідно:

зареєструватися на сайті

http://www.dgma.donetsk.ua/tolpkonf-2019.html – *до 9 вересня 2019 року*

надіслати на адресу оргкомітету:

- ✓ ***заявку та тези доповідей в електронному вигляді обсягом 1–2 сторінки – до 9 вересня 2019 року;***
- ✓ ***копію квитанції про сплату організаційного внеску – до 16 вересня 2019 року.***

Організаційний внесок для участі в конференції:

- без виставкових експонатів – 200 грн;
- з виставковими експонатами – за погодженням з організаційним комітетом.

VII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ І ОБЛАДНАННЯ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ »

14 – 18 жовтня 2019 року

ЗАЯВКА
на участь у конференції

Прізвище.....

Ім'я .....

По батькові .....

Місце роботи та службова адреса.....

.....

.....

Посада .....

.....

Науковий ступінь і звання .....

.....

✉ Адреса доповідача (для листування).....

.....

.....

E-mail: .....

☎Tel:.....Fax: .....

Інформація про доповідь (назва).....

.....

.....

.....

Автори:.....

.....

Необхідні технічні засоби:

Відеопроектор ☐ Графопроектор ☐

Комп'ютер ☐

Інші _____

Участь з виставковими експонатами:

Так ☐ ***Ні*** ☐

Робочі мови конференції: ***українська, російська, англійська.***

До початку роботи конференції планується видання ***збірника тез*** доповідей, а за результатами конференції – розміщення доповідей на сайті академії й підготовка спеціального випуску Вісника ДДМА (ISSN: 1993-8322).

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТЕЗ для опублікування в збірнику

До публікації у збірнику тез приймаються матеріали обсягом **1–2 повні сторінки**. Матеріали подаються у вигляді електронного файлу по e-mail. Текст тез оформити в редакторі **MS Office Word** на сторінках формату А4 (210 × 297 мм) з полями 20 мм з усіх боків. **Аркуші не нумерувати**. Орієнтація сторінки – книжкова. Для розміщення табличних даних, графіків, схем, рисунків за необхідності допускається альбомна орієнтація сторінок. Текст оформити шрифтом Times New Roman Cyr (звичайний) розміром 14 пт; інтервал між рядками – **одинарний**; абзацний відступ – 1,25 см; вирівнювання – по ширині сторінки з переносами слів. *Літературу оформити шрифтом Times New Roman Cyr (курсив)* розміром 12 пт. **Напівжирний шрифт не допускається**.

Ілюстративний матеріал розташовується безпосередньо в тексті. Допускається обтікання рисунків текстом. **Кольорові ілюстрації не допускаються**. Підписи під рисунком – з абзацного відступу. Формат підпису: Рис. 1. Назва рисунка.

Таблиці оформлюються за вимогами ВАК.

Формули набираються в редакторі **MS Equation 2.0/3.0**, вирівнювання – по центру. Нумерацію формул виконати, вирівнюючи номер по правому краю.

Порядок оформлення тез. На першій сторінці в першому рядку з абзацу шрифтом **Times New Roman Cyr (напівжирний)** розміром 14 пт прописними літерами набирається заголовок тез.

Через рядок з абзацу – прізвище та ініціали автора, у дужках вказати назву міста та скорочену назву організації. Нижче через рядок з абзацу – основний текст тез.

Список літератури озаглавлювати словом **ЛІТЕРАТУРА**, набраним шрифтом **Times New Roman Cyr (напівжирний)** розміром 14 пт прописними літерами по центру сторінки через рядок від основного тексту. **Список літератури** оформити шрифтом *Times New Roman Cyr (курсив)* розміром 12 пт; інтервал між рядками – одинарний.

Просимо дотримуватися викладених вимог і термінів подання матеріалів, зазначених у запрошенні!

Тези, оформлені з відхиленнями від зазначених вимог і надіслані не в строк, не публікуються й не повертаються.

ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ИНДУСТРИИ

LAB ComplEX

XII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА LABComplEX

АНАЛИТИКА ЛАБОРАТОРИЯ БИОТЕХНОЛОГИИ HI-TECH

При поддержке: Комитетов Верховной Рады Украины
Министерств и ведомств
Профильных ассоциаций и объединений

Организаторы:

ВНИМАНИЕ! НОВОЕ МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Выставочный центр АССО International
Украина, г. Киев, пр-т Победы, 40-Б, ст. метро «Шулявская»

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРИЙ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ, ЛАБОРАТОРНОЕ, ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ И УСЛУГИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРИЙ

25–27 СЕНТЯБРЯ 2019

270 ТОРГОВЫХ МАРОК, МИРОВЫХ БРЕНДОВ

35 НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

6 500 ПОСЕТИТЕЛЕЙ

300 ДОКЛАДЧИКОВ

МЕЖДУНАРОДНОЕ УЧАСТИЕ И ПОСЕЩЕНИЕ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ И БИЗНЕС ПРОГРАММЫ, МАСТЕР-КЛАССЫ НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ

По вопросам участия в выставке:
+380 (44) 206-10-16
lab@lmt.kiev.ua
lab_2@lmt.kiev.ua

По вопросам участия в научно-практической программе:
+380 (44) 206-10-99
info@labcomplex.com

www.labcomplex.com

адреса редакції та друкарні

Україна, 03142, м. Київ, бул. Акад. Вернадського, 34/1
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
Телефон: (044) 424-04-10, факс (044) 424-35-15, e-mail: mlu@ptima.kiev.ua
Інформація про журнал на сайті: www.steelcast.com.ua
Надруковано ТОВ «Про формат», вул. Маршала Жукова, 45 Б.