Механика деформируемого твердого тела

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-3>
УДК 539.3, 539.4, 669.715

А.А. Соснин, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Н.А. Богданова

СОСНИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., старший научный сотрудник,
SPIN: 3618-2849, AuthorID: 632536, ORCID: 0000-0001-7315-9213,
ScopusID: 55184706500, e-mail: sosnin@imim.ru

ЖИЛИН СЕРГЕЙ ГЕНАДЬЕВИЧ – к.т.н., ведущий научный сотрудник, доцент,
SPIN: 7519-1172, AuthorID: 177858, ORCID: 0000-0002-0865-7109,
ScopusID 56047191300, ResearcherID: H-5722-2016, e-mail: zhilin@imim.ru

КОМАРОВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., ведущий научный сотрудник, доцент,
SPIN: 8087-2080, AuthorID: 625515, ScopusID 56432713000,
ORCID: 0000-0002-7121-4271, ResearcherID: H-9129-2016,
e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

БОГДАНОВА НИНА АНАТОЛЬЕВНА – младший научный сотрудник,
SPIN: 9200-8101, AuthorID: 644043, ORCID: 0000-0002-8769-8194,
ResearcherID: M-7889-2013, e-mail: joyful289@inbox.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Металлургов ул., 1, Комсомольск-на-Амуре, Россия, 681005

Модернизация установки литья и деформации металла: формирование бездефектной протяженной алюминиевой поковки

Аннотация: Ресурсоэффективные технологии и оборудование в машиностроении почти достигли предела, поэтому для совершенствования металлопрофилирования перспективен совмещенный процесс литья и деформации на специальных устройствах. Российские и зарубежные предприятия проявляют значительный интерес к исследованиям в этом направлении, в этой связи перспективной представляется реализация процесса совмещения операций расплавления и деформации металла. Данная статья посвящена экспериментальному исследованию возможности бездефектного формирования протяженной алюминиевой поковки в непрерывном режиме на усовершенствованном авторами устройстве горизонтального литья и деформации металла. При выборе материала определяющее значение имела его применимость к процессам формирования из него полуфабрикатов в виде поковок методами горячей или холодной деформации. Марка материала, подвергаемого деформации, – АД0. Приведены результаты комплексного решения проблемы дефектообразования при получении протяженных поковок в ходе авторского эксперимента. Отмечены преимущества экспериментального устройства, приведены принципиальные схемы узлов, обеспечивающих термостабильный процесс на этапах подачи расплава в устройство и стадии деформирования. Определены физико-механические свойства поковок, полученных экспериментальным способом.

Представленные результаты исследований позволят усовершенствовать технологии формирования протяженных поковок из цветных и черных металлов с повышенными физико-механическими характеристиками, в том числе технологии получения биметаллических изделий. Авторская разработка перспективна для предприятий металлургии и машиностроения.

Ключевые слова: протяженная поковка, деформация, напряжение, многобойковое устройство, профиль, дефектообразование, температурный режим, гидростатический напор.

Введение

Поиск вариантов сокращения количества технологических этапов при получении сортовой металлопродукции определяет необходимость разработки и совершенствования процессов, направленных на совмещение ряда операций в одном устройстве. Актуальность исследований, проводимых в настоящее время в данном направлении в РФ и за рубежом, обусловливается значительным интересом промышленных предприятий, которые в рамках стратегии развития продукции ориентированы на модернизацию металлургического производства в целом и полагаются на неизбежный рост металлоемкости [8, с. 181; 11, с. 4]. Работы по совмещению металлургических и машиностроительных процессов в РФ проводятся на протяжении последних десятилетий и на ряде производств. В научно-исследовательских предприятиях разработаны устройства совмещенного литья и деформации, позволяющие получать поковки из цветных и черных сплавов в непрерывном режиме [3, с. 30; 5, с. 322; 12, с. 3]. Возможности такого метода профилирования позволяют реализовать производство биметаллических изделий, например на основе стали и меди [4, с. 33].

Так, получение поковки в непрерывном режиме на устройстве горизонтального литья и деформации металла, разработанном в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН и усовершенствованном авторами, реализуется за счет совмещения металлургического процесса, при котором в подвижном кристаллизаторе обрабатываемый алюминиевый сплав кристаллизуется и одновременно деформируется [9, с. 2–4]. Конструкция устройства включает кристаллизатор с подвижными стенками, осуществляющими сразу несколько функций: теплоотвод из зоны кристаллизации, подачу металла в зону деформации, обжатие металла до требуемого профиля и калибровку [10, с. 25]. Последовательность операций получения поковки при помощи устройства совмещенного литья и деформации металла горизонтального типа, представленного на рис. 1, следующая: в загрузочное окно 1 устройства 2 подается расплав металла, заполняющий зону кристаллизатора 3, представляющего собой профилирующие бойки 4, приводящиеся в действие эксцентриковыми валами 5, осуществляющими одновременно обжатие и протяжку. Отведение тепла из зоны кристаллизатора 3 осуществляется посредством каналов 6, выполненных в профилирующих бойках 4.

Рис. 1. Схема устройства совмещенного литья и деформации металла горизонтального типа.

Несомненными преимуществами процесса, реализуемого на таком устройстве, являются физико-механические свойства продукта. В сравнении с поковками, получаемыми холодной прокаткой, на устройстве литья и деформации металла достигается увеличение пределов прочности и текучести [14, с. 413]. Недостатками процесса, в сравнении, например, с

холоднокатаными образцами, является значительное (в ряде случаев до трех раз) снижение величины относительного удлинения экспериментальных образцов. Многофакторность процесса получения поковки на установках такого типа необходимо учитывать при определении величин сопротивления пластической деформации металла, зависящих от степени деформирования, ее скорости и температуры [1, с. 24].

Кроме того, сложность при реализации процесса представляет терморегуляция, обуславливающая напряженно-деформированное состояние поковки на всех технологических переделах составляющего ее материала, что определяет необходимость решения целой серии задач. Так, задача повышения эффективности отведения тепла от кристаллизатора на установках горизонтального литья и деформации металла решалась использованием перфорации трубки подвода охлаждающей жидкости [13, с. 32], которую устанавливали в канал 6, представленный на рис. 1.

Поскольку на такой процесс влияет значительное число факторов, результат формоизменения металла заранее можно прогнозировать, лишь значительно упростив математическую модель. В ходе серии экспериментов, направленных на численное моделирование процессов формирования металлоизделий на устройствах совмещенного литья и деформации металла вертикального [6, с. 85–86] и горизонтального [7, с. 48] типов, нами установлено, что в результате интенсивной деформации при кристаллизации расплава, сопровождаемой ростом сжимающих напряжений, значение гидростатического давления в слоях поковки, граничащих с бойками, выше, чем в остальном объеме подвергнутого деформированию материала. Это приводит к образованию дефектов в поковке в виде пор и раковин.

Поковки, получаемые из сплавов на основе алюминия, могут иметь дефекты в виде периферийных и сквозных трещин, возникающих вследствие высоких напряжений в металле. На рис. 2 представлен фрагмент дефектной поковки из технического алюминия АД0, ГОСТ 4784-97, с периферийными трещинами, появляющимися на участках интенсивной деформации.

Рис. 2. Фрагмент дефектной поковки из АД0, полученной на установке совмещенного литья и деформации металла горизонтального типа.

Решение задачи устойчивого процесса получения поволоков из сплавов на основе алюминия осложняется его свойствами, а именно достаточно узким интервалом кристаллизации [2, с. 60]. Это обстоятельство предъявляет высокие требования к конструктивному исполнению устройств литья и деформации металла, призванных обеспечить температурные режимы для наиболее благоприятных условий пластического деформирования сплавов на основе алюминия. Таким образом, экспериментальное совершенствование и модернизация конструкций устройств, реализующих совмещение процессов литья и деформации сплавов на основе алюминия с учетом известных постулатов об изменении их свойств при механических и тепловых воздействиях, представляется новым и востребованным.

Целью работы является определение возможности бездефектного формирования протяженной алюминиевой поковки при конструктивном изменении узлов установки литья и деформации металла.

Для реализации цели в работе решались следующие задачи:

- внесение изменений в конструкцию устройства подачи расплава в установку непрерывного литья и деформации металла, направленных на обеспечение его постоянного гидростатического давления;
- экспериментальное опробование процесса получения протяженной поковки прямоугольного поперечного сечения из технического алюминия АД0 и определение ее физико-механических свойств.

Методы и подходы

При выборе материала определяющее значение имела его деформационная способность, а именно применимость к процессам формирования из него полуфабрикатов в виде листов, лент, полос, плит, профилей, штамповок и поволоков методами горячей или холодной деформации. В качестве материала, подвергаемого деформации, мы выбрали технический алюминий АД0 с содержанием Al более 99,5%, химический состав которого соответствует ГОСТ 4784-97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки». Механические свойства профиля материала АД0 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, согласно ГОСТ 8617-81 «Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия», следующие: временное сопротивление разрыву $\delta_g = 59\text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta_s = 20\%$. ГОСТ 8617-81 не нормирует значение предела текучести δ_f для материала АД0. Интервал значений твердости для деформированного АД0 составляет $\text{НВ } 10^{-1} = 30\text{--}35\text{ МПа}$.

Процесс терморегуляции расплава, поступающего в профилирующее устройство, осуществляли при помощи специально сконструированного узла, обеспечивающего постоянное гидростатическое давление, представленного на рис. 3.

Процесс профилирования выбранного материала осуществляли на устройстве совмещенного литья и деформации металла горизонтального типа, выполненном согласно [12], с мощностью привода 8 кВт, обеспечивающего скорость выхода из профилирующего устройства протяженной поковки сечением 40x12 мм 1,5 м/мин при расчетном значении силы обжатия 1,4 кН/м².

По завершении процесса из профиля механической вырезкой получены образцы для испытаний на разрыв согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». В качестве средства измерения использована универсальная испытательная машина AG-X plus 250 кН. Скорость нагружения 0,1 мм/с. Контроль перемещения траверсы при растяжении образцов обеспечивается техническими возможностями испытательной машины AG-X plus.

Значения ширины и высоты сечений получаемых поволоков определяли при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм.

Результаты и обсуждение

Конструктивное исполнение устройств, предназначенных для поддержания уровня металла, применяется в отечественной и зарубежной практике достаточно давно. Так, согласно авторскому свидетельству СССР № 538813 (опубл. 13.06.1975), разработана система поддержания уровня жидкого металла в двухручьевом кристаллизаторе установки непрерывной разливки металла, которая содержит промежуточный ковш, датчики уровня металла и стопор слива металла из раздаточного ковша в промежуточный ковш. Подобные ей системы не позволяют точно регулировать уровень металла в промежуточном ковше, что не обеспечивает постоянное гидростатическое давление металла при его разливке. Другие устройства для автоматического поддержания постоянного расхода металла из промежуточно-

го ковша установки непрерывного литья выполнены по авторскому свидетельству СССР № 707690 (опубл. 06.04.1977). Эти устройства содержат разливочный ковш с приводом слива металла, соединенный с блоком автоматики, где под разливочным ковшом расположен промежуточный ковш (с датчиком уровня металла), выход которого соединен с блоком автоматики. Их конструкция в полной мере не позволяет поддерживать постоянное гидростатическое давление струи металла, выходящей из промежуточного ковша, так как в установке такого типа не контролируется высота столба металла от верхнего его уровня в промежуточном ковше до заданного уровня металла в устройстве непрерывного литья. Это обусловлено невысокой точностью показаний датчика уровня металла поплавкового типа в промежуточном ковше вследствие возникающего волнения поверхности расплава (при доливке из раздаточного ковша).

Задачей устройств нового типа является обеспечение постоянного гидростатического давления разливаемого металла в загрузочное окно установки литья и деформации за счет поддержания высоты столба расплава от уровня металла в промежуточном ковше до заданного уровня металла в установке. На рис. 3 представлена схема устройства для обеспечения постоянного гидростатического напора. Эта схема содержит раздаточный ковш 1 с приводом 2 стопора 3 слива металла из ковша 1, промежуточный ковш 4 с дозирующим стаканчиком 5 (расположен на площадке 6), снабженной сервоприводом 7, обеспечивающим ее движение по вертикали. Под промежуточным ковшом 4 расположены датчики 8 веса ковша 4, соединенные с входом блока 9 автоматики. Сервопривод 7 площадки 6 присоединен к выходу блока 9 автоматики, привод 2 стопора 3 слива металла из ковша 1 соединен с выходом блока 9 автоматики.

**Рис. 3. Схема устройства
для обеспечения постоянного гидростатического напора.**

Устройство работает следующим образом. В блок 9 автоматики (контроллер позиционирования Assirax G5) вносится требуемое значение высоты площадки 6 относительно загрузочного окна 10. Далее блок 9 автоматики определяет значение веса промежуточного ковша 4 с расплавленным металлом с помощью датчиков веса 8. Вес промежуточного ковша 4 с расплавленным металлом с помощью алгоритмов блока 9 автоматики пересчитывается в высоту уровня металла в промежуточном ковше 4, благодаря чему определяется общая высота столба разливаемого металла. По мере выхода металла из промежуточного ковша 4 его вес уменьшается, это фиксируется датчиками 8, что в свою очередь уменьшает гидростатическое давление струи металла. Чтобы поддержать гидростатическое давление струи металла, необходимо поднять площадку 6 относительно уровня загрузочного окна 10, чтобы сохранить высоту уровня металла в промежуточном ковше 4 относительно уровня металла в загрузочном окне 10. Для этого блок 9 автоматики подает сигнал на сервопривод 7, который поднимает промежуточный ковш 4. Доливка металла в промежуточный ковш 4 из раздаточного ковша 1 путем подъема стопора 3 приводом 2 увеличивает вес промежуточного ковша 4 и поднимается уровень металла в промежуточном ковше 4, который затем опускается сервоприводом 7 командой блока 9 автоматики, чтобы сохранить гидростатическое давление.

Таким образом, регуляция температуры расплава обеспечивается благодаря тому, что изначально заданное гидростатическое давление, обусловленное высотой столба металла от его уровня в промежуточном ковше до уровня в загрузочном окне установки непрерывного литья и деформации, контролируется и задается всей совокупностью элементов устройства. При понижении уровня металла в промежуточном ковше блок автоматики поднимает площадку, на которой расположен промежуточный ковш, поддерживая гидростатическое давление. При минимально заданном уровне металла в промежуточном ковше блок автоматики временно открывает запорный клапан разливочного ковша, что повышает уровень металла в промежуточном ковше. Далее блок автоматики корректирует положение промежуточного ковша, сохраняя гидростатическое давление, опираясь на показания датчика веса промежуточного ковша с металлом.

Благодаря заданному алгоритму блок автоматики пересчитывает показания датчика веса промежуточного ковша с металлом в показания уровня металла в промежуточном ковше. Это позволяет точно определить уровень металла в промежуточном ковше и точно знать высоту столба металла от уровня металла в загрузочном окне до уровня металла в промежуточном ковше и производить требуемую корректировку положения, обеспечивающего постоянство гидростатического давления. Снабжение установки площадкой с сервоприводом (соединенным с блоком автоматики), выполненной с возможностью перемещения по вертикали, обеспечивает точность позиционирования площадки для поддержания гидростатического давления, а связь блока автоматики с приводом стопора слива металла из раздаточного ковша позволяет автоматически добавлять металл при его недостатке в промежуточный ковш.

На рис. 4 представлен фрагмент поковки из АД0, полученной на установке литья и деформации металла горизонтального типа в условиях постоянного гидростатического давления. Визуально определимых дефектов на поверхности поковки не обнаружено.

Рис. 4. Фрагмент поковки из АД0, полученной в условиях постоянного гидростатического давления.

На рис. 5 представлена графическая зависимость напряжений от деформации по результатам серии испытаний образцов из экспериментальных поковок, полученных на установке литья и деформации металла горизонтального типа, снабженного устройством для обеспечения постоянного гидростатического напора.

Рис. 5. Диаграмма растяжения образца, полученного в условиях постоянного гидростатического давления.

Рисунок 5 иллюстрирует: значения основных механических характеристик (δ_e и δ_s) поковки из материала АД0 значительно превышают представленные выше значения, характерные для холоднодеформированного материала АД0. Из числа физических характеристик следует отметить значение модуля упругости Юнга, составившее 5731 МПа для материала полученной поковки.

Выводы

Представленные выше физико-механические характеристики свидетельствуют о значительном упрочнении материала металлоизделия, полученного совмещенным методом литья и прокатки (особенно в сравнении с широко используемыми методами холодного деформирования).

При использовании устройства, позволяющего обеспечить постоянство гидростатического давления разливаемого металла, в установке литья и деформации металла горизонтального типа появляется возможность регулирования процессов формирования бездефектной протяженной алюминиевой поковки с высокими механическими характеристиками.

Представленная разработка перспективна для предприятий металлургии и машиностроения. Результаты исследований направлены на реализацию технологий формирования протяженных поковок с повышенными физико-механическими характеристиками из цветных и черных металлов, в том числе получение биметаллических изделий.

Вклад авторов в статью: А.А. Соснин – разработка конструкции устройства для обеспечения постоянного гидростатического напора; С.Г. Жилин – разработка 3D-модели устройства совмещенного литья и деформации металла горизонтального типа; О.Н. Комаров – экспериментальное опробование процесса получения протяженной поковки прямоугольного поперечного сечения из технического алюминия АД0; Н.А. Богданова – определение физико-механических свойств протяженной поковки, аналитическая обработка результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман М.Я. О сопротивлении пластической деформации в процессах прокатки и непрерывного литья металлов // Металлы. 2004. № 3. С. 24.
2. Золоторевский В.С., Поздняков А.В., Канакиди Я.Ю. О связи полного и эффективного интервалов кристаллизации с горячеломкостью многокомпонентных сплавов на основе алюминия // Известия вузов. Цветная металлургия. 2012. № 5. С. 57–62.
3. Лехов О.С., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 6. С. 30–35.
4. Лехов О.С., Лисин И.В., Туев М.Ю. Расчет температуры кристаллизатора при непрерывном процессе литья-деформации биметаллической полосы // Производство проката. 2014. № 12. С. 33–36.
5. Минаев А.А. Совмещенные металлургические процессы: монография. Донецк: Технопарк ДонГТУ. УНИТЕХ, 2008. 552 с.
6. Одинокое В.И., Бондаренко С.В. Моделирование процесса деформации металла, имеющего дефекты, на литейно-ковочном модуле // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 2. С. 85–89.
7. Одинокое В.И., Соснин А.А. Математическое моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле горизонтального типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 3. С. 48–53.
8. Рыков М. Основные стратегии адаптации российской металлургии к торговым правилам ВТО // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2013. № 1. С. 178–183.
9. Соснин А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование совмещенного процесса и деформации металла: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. Комсомольск-на-Амуре, 2012. 140 с.
10. Соснин А.А., Черномас В.В. 3D моделирование установки горизонтального литья и деформации металла в программной среде T-FLEX // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 12. С. 25–29.
11. Темлянец М.В., Уманский А.А., Целлермаер В.Я. Анализ перспективных технологических решений по организации термического упрочнения фасонных профилей на современных сортовых прокатных станах // Вестн. Сибир. гос. индустр. ун-та. 2016. № 3 (17). С. 4–7.
12. Черномас В.В., Одинокое В.И., Скляр С.Ю. Устройство для непрерывного горизонтального литья и деформации металла: пат. РФ № 2401175 РФ. Заявл. 06.03.2009, опубл. 10.10.2010, Бюл. № 28.
13. Черномас В.В., Саликов С.Р., Одинокое В.И. Исследование эффективности системы охлаждения кристаллизатора установки горизонтального литья и деформации металла // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 8. С. 32–36.
14. Odinokov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S., Stulov V.V., Sklyar S.Yu. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit. Metallurgist. 2009(53);7–8:412–415.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-4-3>

Sosnin A., Zhilin S., Komarov O., Bogdanova N.

ALEXANDR SOSNIN, Candidate of Engineering Sciences, Senior Scientist Researcher, AuthorID: 632536, SPIN: 3618-2849, ORCID: 0000-0001-7315-9213r, ScopusID 55184706500, e-mail: sosnin@imim.ru
 SERGEY ZHILIN, Candidate of Engineering Sciences, Leading Scientist Researcher, Associate Professor, AuthorID: 177858, SPIN: 7519-1172, ORCID: 0000-0002-0865-7109, ScopusID: 56047191300, ResearcherID: H-5722-2016, e-mail: zhilin@imim.ru
 OLEG KOMAROV, Candidate of Engineering Sciences, Leading Scientist Researcher, Associate Professor, AuthorID: 625515, SPIN: 8087-2080, ORCID: 0000-0002-7121-4271, ScopusID 56432713000, ResearcherID: H-9129-2016, e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru
 NINA BOGDANOVA, Junior Scientist Researcher, AuthorID: 644043, SPIN: 9200-8101, ORCID: 0000-0002-8769-8194, ResearcherID: M-7889-2013, e-mail: joyful289@inbox.ru
Institute of Machinery and Metallurgy of Far Eastern Branch RAS
 Metalurgov St., 1, Komsomolsk-na-Amure, Russia, 681005

Modernization of the installation of casting and deformation of metal: forming defect-free long aluminum forgings

Abstract: The prospect of using resource-efficient technologies and equipment in mechanical engineering determines the need to improve metal profiling carried out on devices of the combined casting and deformation process. The relevance of research conducted in these areas in the Russian Federation and abroad is due to the significant interest of industrial enterprises. In this regard, the implementation of the process of combining the operations of melting and deformation of the metal seems to be promising. The aim of the work is to study the possibility of defect-free formation of extended aluminum forgings in continuous mode on a device for horizontal casting and metal deformation. When choosing a material, its applicability to the processes of forming semi-finished products from it in the form of forgings by hot or cold deformation was of decisive importance. The grade of the material subjected to deformation is AD0. The results of a comprehensive solution to the problem of defect formation upon receipt of extended forgings are presented. The advantages of the experimental device are noted, schematic diagrams of the nodes providing the thermostable process at the stages of the melt supply to the device and the deformation stage are given. The physico-mechanical properties of forgings obtained experimentally are determined. The whole scope of research conducted by the authors is very promising for metallurgy and mechanical engineering. The presented research results are aimed at implementing technologies for the formation of long forgings with enhanced physical and mechanical characteristics of non-ferrous and ferrous metals, including the production of bimetallic products.

Keywords: extended forging, deformation, stress, multi-kicker ram device, shape, defect formation, temperature conditions, pressure height.

REFERENCES

1. Brovman M.Ya. On the resistance to plastic deformation in the processes of rolling and continuous casting of metals. *Metals*. 2004;3:24.
2. Zolotarevsky V.S., Pozdnyakov A.V., Kanakidi Y.Yu. About the relationship between the full and effective crystallization intervals with the heat resistance of multicomponent aluminum-based alloys. *News of Higher Educational Institutions. Non-ferrous metallurgy*. 2012;5:57–62.

3. Lekhov O.S., Lisin I.V. Installation of the combined process of continuous casting and deformation for the production of bimetallic strips. *News of Univ. Non-ferrous metallurgy*. 2015;6:30–35.
4. Lekhov O.S., Lisin I.V., Tuev M.Yu. The calculation of the temperature of the mold during the continuous process of casting-deformation of the bimetallic strip. *Production of rolled products*. 2014;12: 33–36.
5. Minaev A.A. Combined metallurgical processes. Monograph. Donetsk, Technopark DonSTU, UNITECH, 2008, 552 p.
6. Odinson V.I., Bondarenko S.V. Modeling the process of deformation of defective metal on a casting and forging module. *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2014;2: 85–89.
7. Odinson V.I., Sosnin A.A. Mathematical modeling of the metal deformation process on a foundry-forging module of horizontal type. *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2012;3:48–53.
8. Rykov M. Basic strategies for adapting Russian metallurgy to the WTO trade rules. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2013;1:178–183.
9. Sosnin A.A. Theoretical and experimental study of the combined process and metal deformation. Abstract of dissertation... Candidate of Technical Sciences. Komsomolsk-on-Amur State Technical Univ., Komsomolsk-on-Amur, 2012. 140 p.
10. Sosnin A.A., Chernomas V.V. 3D modeling of the installation of horizontal casting and deformation of metal in the T-FLEX software environment. *Forging and Stamping. Processing of Materials by Pressure*. 2013;12:25–29.
11. Temlyantsev M.V., Umansky A.A., Zellermaer V.Ya. Analysis of promising technological solutions for the organization of thermal hardening of shaped sections on modern high-quality rolling mills. *Bulletin of the Siberian State Industrial Univ*. 2016 (17);3:4–7.
12. Chernomas V.V., Odinson V.I., Sklyar S.Yu. Device for continuous horizontal casting and deformation of metal. RF Patent No. 2401175 RF, Applic. 03/06/2009, Publ. 10/10/2010, Bull. N 28.
13. Chernomas V.V., Salikov S.R., Odinson V.I. Investigation of the efficiency of the mold cooling system of a horizontal casting and metal deformation plant. *Forging and Stamping. Processing of Materials by Pressure*. 2012;8:32–36.
14. Odinson V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S., Stulov V.V., Sklyar S.Yu. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit. *Metallurgist*. 2009(53);7–8:412–415.