

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.74:669.715.018

**СТЕЦЕНКО**  
**Владимир Юзефович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ПОВЫШЕННОЙ  
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗ СИЛУМИНОВ  
С ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ИНВЕРТИРОВАННОЙ  
СТРУКТУРОЙ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.16.04 – литейное производство

Минск 2021

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси» и Белорусском национальном техническом университете.

Научный консультант	<b>МАРУКОВИЧ Евгений Игнатьевич</b> , академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственных премий БССР и РБ, Заслуженный изобретатель РБ, заведующий лабораторией кинетики кристаллизации ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси»
Официальные оппоненты:	<b>ЛАСКОВНЕВ Александр Петрович</b> , академик НАН Беларуси, доктор технических наук, академик-секретарь Отделения физико-технических наук НАН Беларуси <b>НЕМЕНЕНОК Болеслав Мечиславович</b> , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургия черных и цветных сплавов» Белорусского национального технического университета <b>КАЛИНИЧЕНКО Александр Сергеевич</b> , доктор технических наук, доцент, директор Международного информационно-аналитического центра трансфера технологий Белорусского государственного технологического университета
Оппонирующая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита состоится «19» февраля 2021 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря: (+ 375 17) 292-81-85, e-mail: [vm.konstantinov@bntu.by](mailto:vm.konstantinov@bntu.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «15» января 2021 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.05.14,

доктор технических наук, профессор



В.М. Константинов

## ВВЕДЕНИЕ

Мировой тенденцией в машиностроительном комплексе является стремление заменить железоуглеродистые и медные сплавы, на сплавы, имеющие более высокую удельную прочность в частности, алюминиевые сплавы, что в целом, способствует улучшению эколого-экономической ситуации. Среди литейных алюминиевых сплавов доминирующую роль играют алюминий-кремниевые сплавы (силумины). Силумины, наряду с положительными свойствами, характеризуются такими недостатками, как невысокие физико-механические и антифрикционные свойства. Это создает трудности в использовании деталей из силуминов и сдерживает их широкое применение в промышленности. Чтобы заготовки из силуминов имели высокие технологические, механические и антифрикционные свойства, необходимо получать отливки с высокодисперсной, в частности, инвертированной микроструктурой. Однако, следует отметить, что получить антифрикционный силумин, который мог бы конкурировать с промышленными антифрикционными бронзами, с помощью традиционных модификаторов не удастся. Дополнительная сложность получения высококачественных отливок из силуминов обусловлена широким применением, вторичных сплавов, что приводит к формированию грубой микроструктуры, снижающей физико-механические и эксплуатационные свойства отливок. Недостаточная разработка вопросов теории кристаллизации и модифицирования сплавов не позволяет установить механизм модифицирования и структурной инверсии фаз, что необходимо для разработки промышленных способов литья силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой.

Таким образом, в литейном производстве существует острая научно-техническая проблема, связанная с производством отливок из силуминов широкого назначения, в частности, с высокими антифрикционными свойствами. Успешное решение этой проблемы связано с решением ряда задач как по управлению процессом кристаллизационного формирования структуры силуминов, так и по разработке эффективных, экологически безопасных литейных способов затвердевания, обеспечивающих образование высокодисперсной инвертированной микроструктуры.

Сложность решения данной проблемы обусловлена рядом обстоятельств. Последние исследования структуры жидких металлов показывают отсутствие общих подходов к пониманию, как состояния расплавов, так и механизмов зародышеобразования, во многом определяющих структуру затвердевающей отливки и эксплуатационные свойства. Поэтому необходимо на основе анализа современных результатов более тщательно рассмотреть структуру жидкого силумина и уточнить механизм зародышеобразования, что позволит определить методы управления процессами кристаллизации и последующего затвердевания. Кроме того, эти знания позволят и усовершенствовать способы модифицирования структуры. Известна положительная роль ускоренного затвердевания на структурное диспергирование. Однако существующие способы литья силуминов в кристаллизаторы характеризуются их недостаточной охлаждающей способностью, сильным влиянием масштабного фактора. Необходимо отметить и отсутствие эффективных, промышленно реализуемых и экологически безопасных литейных способов ускоренного затвердевания, обеспечивающих формирование инвертированной микроструктуры силуминов.

Таким образом, настоящая работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы получения отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, обладающих высокими физико-механическими и антифрикционными свойствами, включая развитие ряда положений теории кристаллизации и модифицирования сплавов, а также разработку промышленных способов литья силуминов с инвертированной микроструктурой.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Научные исследования по теме диссертационной работы выполнялись в соответствии с 16-ю заданиями и проектами Государственных научных программ и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ), в том числе: проектом БРФФИ № Т00-179 «Разработать теоретические и технологические принципы литья силуминов с инверсией расположения фаз» (2001–2003 гг., № гос. рег. 20014871); Государственной программой ориентированных фундаментальных исследований (ГПОФИ) «Материал», заданием 5.03 «Исследование процессов кристаллизации при различных механизмах инверсии фаз и разработка технологических основ получения литейных сплавов с инвертированной структурой» (2003–2005 гг., № гос. рег. 20033485); ГПОФИ «Наноматериалы и нанотехнологии», заданием 5.41 «Разработка технологических основ получения заготовок алюминиево-кремниевых сплавов с наноструктурным кремнием методом литья закалочным затвердеванием» (2005 г., № гос. рег. 20051181); ГПОФИ «Поверхность», заданием 2.07 «Исследование износостойкости заэвтектического силумина с инвертированной структурой и наноструктурным эвтектическим кремнием в условиях сухого трения» (2005 г., № гос. рег. 20051180); Государственной программой прикладных научных исследований (ГППНИ) «Металлургия», заданием 2.08 «Разработка и исследование металлургических процессов ускоренной кристаллизации для улучшения структурной наследственности сплавов» (2005–2010 гг., № гос. рег. 20051184); ГППНИ «Металлургия», заданием 2.14 «Разработка рациональной конструкции кристаллизатора для УНРС с целью увеличения производительности процесса и улучшения качества стального слитка» (2006–2010 гг., № гос. рег. 20061109); ГППНИ «Металлургия», заданием 2.13 «Разработка технологии применения алюминиево-кремниевого модификатора для повышения дисперсности структуры непрерывнолитого стального слитка» (2006–2010 гг., № гос. рег. 20061110); ГППНИ «Металлургия», заданием 2.17 «Разработка технологических процессов литья деформируемых силуминов и штамповки из них деталей типа втулки» (2009–2010 гг., № гос. рег. 20092784); ГППНИ «Металлургия», заданием 2.16 «Разработка технологического процесса переработки отходов алюминиевых сплавов с целью получения модификаторов» (2009–2010 гг., № гос. рег. 20092639); Государственной программой научных исследований (ГПНИ) «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», подпрограммой «Материалы в технике», заданием 4.4.04/1 «Получение непрерывнолитых сплавов с повышенными механическими свойствами. Разработка наноструктурного алюминиево-кремниевого сплава и технологических основ получения из него

литых заготовок диаметром 50–100 мм, обеспечивающих замену деталей машиностроения из антифрикционных бронз» (2011–2013 гг., № гос. рег. 20121300); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», подпрограммой «Металлургия», заданием 2.2.09 «Разработка технологических основ и методов получения и термообработки сплошных и полых отливок из алюминийево-кремниевых сплавов с высокодисперсной и инвертированной микроструктурами, изготовление опытных образцов оборудования и заготовок с повышенными свойствами» (2011–2013 гг., № гос. рег. 20110751); Государственной программой освоения в производстве новых и высоких технологий на 2011–2015 годы, заданием № 4 «Разработать и внедрить экологически безопасные технологические процессы литья силуминов с высокодисперсной и инвертированной микроструктурой и создать на базе ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» производство заготовок деталей машиностроения из силуминов с повышенными механическими и антифрикционными свойствами, не уступающими бронзе» (2012–2013 гг., № гос. рег. 20122299); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», подпрограммой «Металлургия», заданием 2.2.16 «Разработка метода литья на струйный кристаллизатор биметаллических заготовок «сталь–силумин» с высокими механическими и антифрикционными свойствами для червячных колес редукторов» (2014–2015 гг., № гос. рег. 20140287); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», подпрограммой «Металлургия», заданием 2.2.15/1 «Разработка технологии литья направленным затвердеванием от интенсивно-охлаждаемого металлического стержня полых цилиндрических заготовок из силуминов для подшипников скольжения взамен аналогичных из бронзы» (2014–2015 гг., № гос. рег. 20140285); ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограммой «Металлургия», заданием 2.2.02 «Исследование влияния металлургических и технологических параметров на образование глобулярного кремния в алюминийево-кремниевых сплавах при литье в металлические охлаждаемые формы» (2016–2018 гг., № гос. рег. 20160252); проектом БРФФИ № Т18ПАКГ–002 «Антифрикционный силумин как заменитель антифрикционных бронз» (2018–2019 гг., № гос. рег. 20181059).

### **Цель и задачи исследования**

Целью настоящей работы является развитие механизмов нуклеации и модифицирования, разработка способов литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без применения модификаторов для получения заготовок с высокими механическими и антифрикционными свойствами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести термодинамические расчеты структуры металлических расплавов и процесса их кристаллизации, предложить механизмы этих процессов;
- развить физико-химические принципы, уточнить механизмы модифицирования микроструктуры силуминов;
- разработать способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без применения примесных модификаторов;
- разработать технологическое оборудование для литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой методом ускоренного затвердевания отливок;

- исследовать свойства заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой;
- провести опытно-промышленные испытания силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой;
- создать опытно-промышленное производство для получения заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой.

**Научная новизна состоит:**

- в выявлении возможных механизмов демодифицирующего действия адсорбированных атомов водорода и кислорода на процесс кристаллизации силумина и определении влияния скорости затвердевания на формирование отливок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, что позволило разработать принципы создания кристаллизаторов, с затопленно-струйной системой охлаждения, позволяющих, по сравнению с обычными, повысить интенсивность охлаждения в 2–3 раза;
- в установлении влияния смачиваемости поверхности на процесс образования и удаления из расплава пузырьков водорода, который реализуется на смачиваемых поверхностях и изменение энергии Гиббса процессов образования и удаления пузырьков водорода меньше нуля, в отличие от несмачиваемых поверхностей, для которых эта величина является положительной;
- в разработке режимов охлаждения силуминов в кристаллизаторе с затопленно-струйной системой охлаждения, обеспечивающем линейную скорость затвердевания 1–2 мм/с в отличие от обычного кристаллизатора, где линейная скорость затвердевания – 0,4–0,6 мм/с, что позволило получить в структуре силуминов глобулярные включения эвтектического кремния размером 1–3 мкм, а первичных включений кремния – 15–30 мкм, без применения модификаторов;
- в разработке режимов закалочного затвердевания силуминов, реализуемых при охлаждении отливки с толщиной наружной корочки 3–8 мм и жидкой сердцевиной, в ванне с затопленно-струйным охлаждением, что позволило увеличить линейную скорость затвердевания до 4–6 мм/с и получить дисперсность глобулярных включений эвтектического кремния диаметром 0,2–0,6 мкм, а первичного кремния 10–25 мкм, без применения модификаторов;
- в обосновании и экспериментальном подтверждении высоких антифрикционных свойств силумина АК15МЗ с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, который по сравнению с бронзой БрОЦС5-5-5 в условиях без смазки при нормальной нагрузке 12,8 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 620 об/мин имел линейный износ в 7 раз ниже, а в условиях трения со смазкой при нормальной нагрузке 200 Н и вращении со скоростью 300 об/мин – в 23 раза;
- в определении механизма влияния натрия на процесс модифицирования силуминов, состоящего в образовании натрийсодержащей эмульсии, увеличивающей вязкость расплава более чем в 2 раза, на которой преимущественно происходит выделение пузырьков водорода при газэвтектической реакции, что приводит к ослаблению их блокирующего действия на процесс роста  $\alpha$ -фазы и эвтектического кремния.

Новизна технических решений по способам формирования высокодисперсной инвертированной микроструктуры в силуминах защищена 100 патентами, из которых 12 – зарубежные.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты термодинамических расчетов процессов формирования и удаления пузырьков водорода при кристаллизации эвтектики силуминов, позволившие раскрыть механизм ее модифицирования, заключающийся в ослаблении блокирующего действия пузырьков водорода, выделяющихся при газоевтектической реакции, на процесс формирования и роста  $\alpha$ -фазы и  $\beta_{Si}$ -фазы.

2. Результаты термодинамических расчетов процессов структурообразования в расплавах силуминов, рассматриваемых как системы, состоящие из нанокристаллов  $\alpha$ - и  $\beta_{Si}$ -фаз, адсорбированных атомов кислорода и водорода, позволившие определить влияние скорости затвердевания на степень инвертирования микроструктуры силуминов, что послужило научно-технологической основой для разработки кристаллизаторов с затопленно-струйным охлаждением, обеспечивающим в 2-3 раза более высокую скорость затвердевания отливок, чем у существующих.

3. Принципы закалочного затвердевания силуминов, реализуемые при охлаждении системы «затвердевшая оболочка – жидкая сердцевина» в ванне с затопленно-струйным охлаждением, позволяющим увеличить линейную скорость затвердевания с 0,4–0,6 мм/с до 4–6 мм/с и получить глобулярные включения эвтектического кремния дисперсностью 0,2–0,6 мкм и первичного кремния – 10–25 мкм, без применения модификаторов.

4. Условия формирования инвертируемой микроструктуры в кристаллизаторе с затопленно-струйной системой охлаждения, обеспечивающие повышение линейной скорости затвердевания по сравнению с обычным кристаллизатором в 2,5–3 раза, что позволило получить отливки с глобулярными включениями эвтектического кремния 1-3 мкм и первичными включениями кремния 15-30 мкм, без применения модификаторов.

5. Результаты экспериментальных исследований, позволившие создать сплавы с инвертированной микроструктурой, в том числе, антифрикционный силумин, содержащий 15 мас. % кремния и 3 мас. % меди, который заменяет в узлах трения более дорогие и тяжелые антифрикционные промышленные бронзы БрОЦС5-5-5 и БрАЖ9-4; легкоплавкие, экологически безопасные, универсальные силуминовые модификаторы, содержащие 16–18 мас. % кремния, 4–6 мас. % магния, 0,4–0,6 мас. % кальция и титана, позволяющие модифицировать микроструктуру отливок из черных и цветных сплавов.

#### **Личный вклад соискателя**

Термодинамические исследования и расчеты металлических расплавов, процессов кристаллизации и модифицирования выполнены лично автором.

Разработка принципов модифицирования микроструктуры силуминов производилась совместно с академиком, доктором технических наук, профессором Маруковичем Е.И. Разработка механизма процессов кристаллизации металлических расплавов и модифицирования принадлежит автору. Ему также принадлежит разработка способа затопленно-струйного охлаждения рубашки кристалли-

затора. Разработка способов литья ускоренным охлаждением, технологического оборудования, антифрикционного силумина и их патентование производились совместно с академиком, доктором технических наук, профессором Маруковичем Е.И. Разработка универсальных силуминовых модификаторов проводилась совместно со старшим научным сотрудником Гутевым А.П. Создание технологического оборудования, проведение экспериментальных исследований, испытания антифрикционного силумина и универсальных силуминовых модификаторов, создание опытно-промышленного производства литых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой осуществлялись совместно со старшим научным сотрудником Гутевым А.П. и научным сотрудником Барановым К.Н.

За цикл работ «Разработка теоретических основ и эффективных способов модифицирования сплавов» автор и его научный консультант по настоящей диссертационной работе в 2011 году награждены премией НАН Беларуси.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных научных семинарах, конференциях, симпозиумах, съездах, конгрессах, ассамблеях: Международной науч.-техн. конф. (МНТК) «Литье 2000. Беларусь» (Минск, 2000); МНТК «Литье и металлургия в XXI в. Беларусь» (Минск, 2001); МНТК «Литейное производство и металлургия 2002 – качество и эффективность» (Минск, 2002); Второй МНТК «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2002); Междунар. симпозиуме «О природе трения твердых тел» (Гомель, 2002); 3-ей Всероссийской науч.-практ. конф. «Литейное производство сегодня и завтра» (Санкт-Петербург, 2002); МНТК «Литейное производство и металлургия 2003. Беларусь» (Минск, 2003); 66<sup>th</sup> World Foundry Congress «Casting technology 5000 years and beyond» (Istanbul, 2004, Turkey); МНТК «Литейное производство и металлургия 2004. Беларусь» (Минск, 2004); МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2006–2020); МНТК «Литейное производство и металлургия 2006. Беларусь» (Барановичи, 2006); VI МНТК «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2006); Eurasia Technology Cooperation Workshop (Inchon, Korea, 2006); VI Konferencja naukowo-praktyczna «Energia w paŃce i technice» (Suwalki, 2007, Polska); МНТК «Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь» (Жлобин, 2007); 7-ой МНТК «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2007); Восьмом съезде литейщиков России (Ростов-на-Дону, 2007, Россия); 8-ом Междунар. конгрессе «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (Харьков, 2007, Украина); Междунар. конф. «Литье алюминия» (Москва, 2007); IX Междунар. науч.-техн. конгрессе термистов и металлургов «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (Харьков, 2008, Украина); Харьковской нанотехнологической ассамблеи – 2008 «Наноматериалы» (Харьков, 2008, Украина); 11-м Междунар. симпозиуме «Технологии, оборудование, качество» (Минск, 2008); 28-ой Междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности» (Ялта – Киев, 2008, Украина); Междунар. науч.-техн. симпозиуме «Наследственность в литейных процессах» (Самара, 2008, Россия); МНТК «Литейное производство и металлургия 2008. Беларусь» (Гомель, 2008); МНТК «Современные методы



и технологии создания и обработки металлов» (Минск, 2008); Forum «Korea – Belarus Science Days» (Seoul, 2008, Korea); 11-м Междунар. симпозиуме «Технологии, оборудование, качество» (Минск, 2008); Seminar BMZ – POSCO «Clean Steel Making Technology» (POSCO Pohang Works, 2008, Korea); XV МНТК «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, 2009); МНТК «Литейное производство и металлургия, 2009. Беларусь» (Минск, 2009); VIII Межгосударственном научном семинаре «Высокоэнергетическая обработка материалов» (Днепропетровск, 2009, Украина); МНТК «Полимерные композиты и трибология» (Гомель, 2009); Девятом съезде литейщиков России (Уфа, 2009, Россия); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2009); II Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Минск, 2010); МНТК «Литейное производство и металлургия 2010. Беларусь» (Минск, 2010); 20<sup>th</sup> International Baltic Conference «Materials engineering 2011» (Kaunas, 2011, Lithuania); МНТК «Литейное производство и металлургия 2011. Беларусь» (Минск, 2011); VI МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2011); МНТК «Литейное производство и металлургия 2012. Беларусь» (Минск, 2012); МНТК «Литейное производство и металлургия 2013. Беларусь» (Минск, 2013); МНТК «Литейное производство и металлургия 2014. Беларусь» (Минск, 2014); МНТК «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь» (Жлобин, 2015); VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2015); МНТК «Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь» (Минск, 2016); 11-й Междунар. науч.-практ. конф. «Литейное производство сегодня и завтра» (Санкт-Петербург, 2016); Междунар. симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2017); МНТК «Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь» (Минск, 2017); МНТК «Литейное производство и металлургия 2018–2019. Беларусь» (Минск, 2018–2019); XVIII Междунар. конф. по науке и технологиям Россия – Корея – СНГ (Москва, 2018); 13-я МНТК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2018); 8-й Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (Самара, 2018).

Результаты диссертации стали основой создания опытно-промышленного литейного производства по изготовлению сплошных и полых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой поставлены более чем на 100 предприятий Республики Беларусь, Российской Федерации, Кореи и Украины. За семь лет (2012–2019 гг.) произведено наукоемкой продукции на сумму, эквивалентную 140 000 долларов США. Реальный экономический эффект предприятий за семилетний период только от замены бронзовых заготовок на заготовки из антифрикционного силумина составил в эквиваленте более 1050 тысяч долларов США.

#### **Опубликованность результатов**

По результатам выполненных исследований опубликовано 230 научных работ, в том числе 3 монографии, 4 препринта; 128 статей в журналах и сборниках научных трудов, из них зарубежных – 23 статьи, в том числе 122 статьи, входящие

в Перечень ВАК Республики Беларусь; 74 работы в материалах международных конференций, из них в зарубежных – 18 работ; 21 тезис докладов, из них 3 – зарубежные.

Новизна технических решений подтверждена 100 патентами, из которых 12 – зарубежные.

Общий объем опубликованных по теме диссертации материалов составляет около 100 авторских листов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из общей характеристики работы, шести глав с краткими выводами, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложения. Полный объем диссертации составляет 308 страниц. Работа включает: 138 страниц текста; 47 иллюстраций на 16 страницах; 6 таблиц на 2-х страницах; библиографию из 480 наименований на 43 страницах, включающую список использованных источников из 150 наименований и список публикаций соискателя из 330 наименований; приложений на 109 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена анализу литературных данных о металлических расплавах, их кристаллизации и модифицировании микроструктуры сплавов. Показано, что теория металлических расплавов недостаточно разработана, поскольку основывается в основном на гипотетических, крайне нестабильных образованиях – кластерах, не имеющих межфазной поверхности. Исходя из кластерной модели, трудно объяснить: образование зародышей – центров кристаллизации (ЦК), высокую скорость кристаллизации, металлургическую структурную наследственность, модифицирование микроструктуры отливок поверхностно-активными примесями. Показано, что теория кристаллизации металлических расплавов также недостаточно разработана, поскольку абсолютизируется роль неметаллических включений (НМВ) и интерметаллидов в процессе формирования ЦК. При этом игнорируется влияние водорода на структурообразование кристаллов фаз. Показано, что механизмы модифицирования сплавов, особенно силуминов, недостаточно разработаны и противоречивы, поскольку абсолютизируется влияние примесей на диспергирование и формообразование кристаллов фаз. При этом у исследователей нет единого мнения, какие модификаторы считать основными: зародышеобразующие или поверхностно-активные. До конца не выяснена их роль в процессе кристаллизации фаз. Показано, что примесные модификаторы обладают рядом существенных недостатков: отсутствие универсальности, перемодифицирование, недостаточное время живучести, экологическая небезопасность, необходимость проведения дегазации расплава.

Недостаточная разработка теории металлических расплавов, кристаллизации фаз и модифицирования сплавов не позволяют понять механизмы модифицирования, инверсии микроструктуры фаз и разработать способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. При этом основными научно-технологическими трудностями являются: недостаточная охлаждающая способ-

ность кристаллизаторов; отсутствие эффективных литейных способов ускоренного затвердевания и инвертирования микроструктуры сплавов, в частности, силуминов. Исходя из этого, предметом исследования являются теоретические и технологические основы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, которая обеспечивает силуминовым деталям высокие механические и антифрикционные свойства. Определены задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена термодинамическим исследованиям структуры металлических расплавов и процессов их кристаллизации. Показано, что основными структурными элементами металлических расплавов являются нанокристаллы кристаллизующихся фаз (нанокристаллы). Выполненный анализ фазового равновесия в системе позволяет утверждать, что металлические расплавы – равновесные двухфазные системы, состоящие из нанокристаллов и атомного газа. Установлено, что удельная межфазная поверхностная энергия нанокристалла пропорциональна его радиусу, что обеспечивает термодинамическую стабильность металлического расплава как наноструктурной системы. Показано, что распад относительно крупных нанокристаллов на более мелкие может в ряде случаев происходить в равновесных условиях без затрат тепловой энергии. На этот процесс оказывают влияние поверхностно-активные элементы (ПАЭ), например, атомарный кислород и водород. Адсорбция ПАЭ на ЦК будет способствовать их распаду по эффекту Ребиндера. Этим можно объяснить зависимость структурной наследственности от перегрева металлического расплава и времени его выдержки. Процессом распада относительно крупных нанокристаллов на более мелкие можно объяснить структурные изменения при перегреве жидких металлов и сплавов.

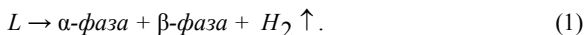
Высокая скорость кристаллизации металлических расплавов при большой интенсивности теплоотвода объясняется тем, что основными строительными элементами кристаллов служат не атомы, а нанокристаллы. Они являются стабильными образованиями. Из нанокристаллов состоят ЦК, которые могут существовать выше температуры ликвидуса и определять эффект структурной наследственности. ЦК образуются путем коагуляции нанокристаллов. Механизм кристаллизации дендритов металлов можно представить следующим образом. Вначале из элементарных нанокристаллов образуются конгломераты нанокристаллов, или они уже имеются в расплаве. Затем из них формируются ЦК. В ряде случаев они уже имеются в жидком металле. Далее из них и конгломератов нанокристаллов образуется дендрит. Механизм процесса плавления происходит в обратном порядке. Установлено, что удельная межфазная поверхностная энергия ЦК и элементов роста дендритного кристалла линейно зависит от их радиусов кривизны.

Установлено, что при затвердевании металлических расплавов пузырьки водорода формируются на хорошо смачивающихся межфазных поверхностях. При этом пузырьки водорода будут тормозить рост вогнутых и плоских поверхностей формирующихся кристаллов и способствовать развитию их выпуклых частей. Это одна из основных причин дендритной формы кристаллов. Пузырьки водорода блокируют рост кристаллизующихся фаз, особенно в силуминах. Относительно большая концентрация водорода в расплаве, при его затвердевании, приводит к формированию в отливке грубой, плохо разветвленной дендритной микроструктуры фаз. При затвердевании эвтектики силуминов пузырьки водорода предпочтительно будут выделяться на кристаллах  $\alpha$ -фазы, поскольку они лучше смачиваются расплавом,

чем кристаллы  $\beta_{Si}$ -фазы. Поэтому при относительно небольшой концентрации водорода в жидком силумине или повышенной скорости затвердевания кристаллы  $\beta_{Si}$ -фазы будут формироваться компактными. В результате получится инвертированная микроструктура.

Показано, что принцип структурного и размерного соответствия Данкова–Конобеевского для анализируемой ситуации можно выразить более корректно следующим образом: подложка может стать центром кристаллизации фазы, если они имеют однотипные кристаллические решетки, а их периоды отличаются не более чем на 8 %. Установлено, что этот основополагающий для ЦК принцип не применим к процессам примесного модифицирования сталей, чугунов и силуминов. Поэтому НМВ и интерметаллиды, которые образуются в расплаве, или вводятся в него с целью модифицирования микроструктуры отливок, не будут служить ЦК фаз, поскольку не удовлетворяют уточненному принципу структурного и размерного соответствия Данкова–Конобеевского. Следует полагать, что НМВ и интерметаллиды играют косвенную роль при кристаллизации сплавов, адсорбируя своими поверхностями ПАЭ, которые отрицательно влияют на формирование ЦК фаз и развитие кристаллов.

**Третья глава** посвящена разработке физико-химических принципов и механизмов модифицирования микроструктуры силуминов. Показано, что основными принципами модифицирования микроструктуры отливок из силуминов являются: коагуляционный принцип, благодаря которому из нанокристаллов образуются ЦК фаз; рафинировочный принцип, благодаря которому раскрывается основной механизм действия модификаторов как элементов, связывающих демодифицирующие ПАЭ (водород и кислород); деблокирующий принцип выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах силумина, благодаря которому предотвращается пузырьковая блокировка роста кристаллов фаз при газозвтектической реакции:



Деблокирующий принцип выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах силумина и соответствующая роль модификатора объясняются термодинамикой процесса формирования газового пузырька на подложке. Первоначально образуется пузырек, который при достижении критического диаметра, отрывается от подложки и всплывает на поверхность металлического расплава. При переходе газового пузырька из первоначального состояния в состояние отрыва интенсивность такого процесса будет определяться изменением энергии Гиббса ( $\Delta G_{II}$ ) согласно следующему уравнению:

$$\Delta G_{II} = \pi r_1^2 (\sigma_{np} - \sigma_{nc}) + (S_2 - S_1) \cdot \sigma_{pz}, \quad (2)$$

где  $r_1$  – радиус контактной поверхности пузырька с подложкой;  $\sigma_{np}$  и  $\sigma_{nc}$  – удельные межфазные поверхностные энергии на границах «подложка – расплав» и «подложка – газ»;  $S_1$  и  $S_2$  – площади межфазных поверхностей пузырьков

с расплавом соответственно в начальный момент и в момент отрыва;  $\sigma_{pe}$  – удельная межфазная поверхностная энергия на границе «расплав – газ».  $S_2 < S_1$ .

Уравнение (2) является определяющим процесс дегазации при кристаллизации силумина. Чем меньше  $\Delta G_{II}$ , тем выше вероятность и интенсивность процесса газовой выделенности. Это означает, что данный процесс термодинамически наиболее предпочтителен на подложках, которые формируют газовые пузырьки с меньшим  $\Delta G_{II}$ . Из уравнения (2) следует, что изменение энергии Гиббса  $\Delta G_{II}$  ниже на подложках с меньшим значением  $\sigma_{np}$ , то есть на более смачиваемых расплавом.

Это означает, что при затвердевании металлического расплава пузырьки газа предпочтительно будут образовываться и выделяться на кристаллах фаз, а не на НМВ, которые хуже смачиваются расплавом. Газовые пузырьки, выделяясь на формирующихся дендритных кристаллах, снижают степень их разветвленности, то есть действуют как демодифицирующий фактор. В этом случае модификаторы – это те вещества, которые снижают концентрацию газа в металлическом расплаве и (или) образуют смачиваемые подложки, на которых будет наиболее предпочтителен процесс газообразования и удаления газовых пузырьков. Повышенная скорость затвердевания силуминов действует как модифицирующий фактор, поскольку на кристаллизующихся фазах выделяется меньше пузырьков водорода.

Исходя из основных принципов модифицирования микроструктуры отливок были разработаны физико-химические механизмы модифицирования кристаллов фаз силуминов. Показано, что при затвердевании модифицированного доэвтектического силумина ЦК первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы являются не интерметаллиды, а кристаллические образования, состоящие из нанокристаллов  $\alpha$ -фазы. Они, в отличие от интерметаллидов, соответствуют принципу структурного и размерного соответствия Данкова–Конобеевского. Атомарный водород, растворенный в жидком силумине, действуя как ПАЭ, способствует распаду и препятствует образованию ЦК первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы. Поэтому роль их модификаторов (интерметаллидов) сводится к активной адсорбции атомарного водорода, который действует как демодификатор первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы в отливках доэвтектического силумина.

Известно, что натрий и стронций весьма незначительно растворяются в алюминии и кремнии, а значит в  $\alpha$ -фазе,  $\beta_{Si}$ -фазе силумина. Поэтому они не могут непосредственно влиять на процесс образования эвтектики и морфологию ее кристаллов. Из-за относительно низких удельных межфазных поверхностных энергий натрия и стронция в расплаве силумина находятся соответственно в виде эмульсии или коллоида, содержащего алюминиды стронция  $SrAl_4$ . Этому способствует атомарный поверхностно-активный водород. Пузырьки водорода, выделяющиеся из жидкого силумина, при газозэвтектической реакции предпочтительно будут формироваться на смачиваемых расплавом натриевой эмульсии или стронциевом коллоиде. Натрий и стронций за счет образования соединений с водородом в виде гидридов снижают содержание свободного (активного) водорода, что приводит к разветвлению эвтектических дендритных кристаллов и получению модифицированной эвтектики.

При модифицировании первичных кристаллов  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы отливок из заэвтектического силумина в основном используют лигатуру Al – Cu – P. При этом оптимальная концентрация фосфора составляет 0,01–0,04 %. Фосфор растворяется в расплаве силумина. Возможна следующая реакция:



Показано, что энергия Гиббса ( $G_T$ ) этой реакции при 1000 К будет определяться следующим уравнением, считая раствор идеальным:

$$G_T = -143 + RT \ln \frac{1}{x_P}, \quad (4)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $x_P$  – концентрация растворенного фосфора;  $T$  – температура расплава. Принимая  $x_P = 0,0004$ ,  $R = 8,314$  Дж/(моль·К),  $T = 1000$  К, получим  $G_T = 2$  кДж/моль. Поскольку оптимальное значение  $x_P = 0,0001$ – $0,0004$ , то, согласно формуле (4), имеем  $G_T > 0$ . Это означает, что при модифицирующей обработке расплава заэвтектического силумина лигатурой Al – Cu – P не происходит образование AlP, а только его распад. Поэтому фосфор будет находиться в растворе.

Рассмотрим термодинамику процесса адсорбции атмосферного кислорода нанокристаллами  $\alpha$ -фазы и  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы. За термодинамический критерий возьмем энтальпию, поскольку она мало зависит от температуры и в основном определяет энергию Гиббса. Адсорбция молекулярного кислорода на нанокристаллах  $\alpha$ -фазы будет осуществляться по следующей реакции:



где  $\{\text{O}\}_A$  – адсорбция атомарного кислорода на алюминии. Адсорбция молекулярного кислорода на нанокристаллах  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы будет происходить по следующей реакции:



где  $\{\text{O}\}_K$  – адсорбция атомарного кислорода на кремнии. Установлено, что энтальпия реакции (6) меньше энтальпии реакции (5). Поэтому адсорбция атомарного кислорода будет преимущественно осуществляться на нанокристаллах  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы. Показано, что энтальпия адсорбции атомарного кислорода на нанокристаллах кремния меньше, чем энтальпия образования  $\text{SiO}_2$ . Поэтому на нанокристаллах  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы стабильно будет существовать только адсорбированный атомарный кислород. Он, как ПАЭ, способствует распаду и препятствует образованию ЦК пер-

вичных кристаллов  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы. Растворенный фосфор взаимодействует с адсорбированным на нанокристаллах  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы атомарным кислородом по следующей реакции:



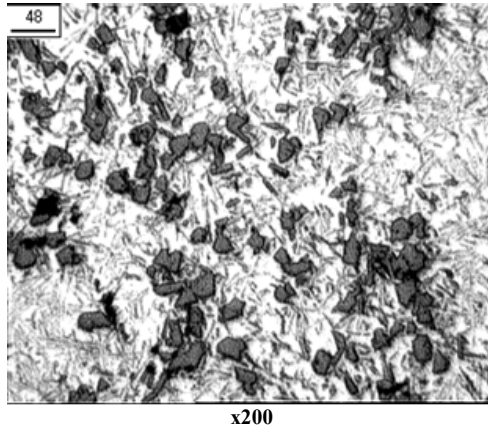
Летучее соединение  $P_2O_5$  легко удаляется в виде пузырей. При этом освобожденные от кислородной блокады нанокристаллы  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы легко коагулируют в ЦК, повышая их концентрацию в расплаве. Аналогично фосфору действуют растворенные в силуминовом расплаве атомы водорода, мышьяка, серы, селена, йода. Они образуют летучие оксиды, рафинируя нанокристаллы  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы от адсорбированного кислорода.

Выполненные исследования дают основания полагать, что действия большинства известных модифицирующих элементов первичной микроструктуры заэвтектического силумина сводятся в основном к рафинированию нанокристаллов  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы от адсорбированного кислорода, который действует как демодификатор первичных кристаллов  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы.

В силуминовом расплаве существует большое количество нанокристаллов  $\alpha$ -фазы и  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы, свободных (частично или полностью) от адсорбированных атомарных кислорода и водорода. Поэтому при повышенной скорости затвердевания образуется достаточное количество ЦК всех основных фаз для получения в отливке высокодисперсной микроструктуры. Высокая скорость затвердевания силуминов будет препятствовать дендритной кристаллизации  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы и способствовать получению инвертированной микроструктуры. Кроме этого, любые способы, разрушающие дендритную кристаллизацию  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы, должны способствовать получению отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой.

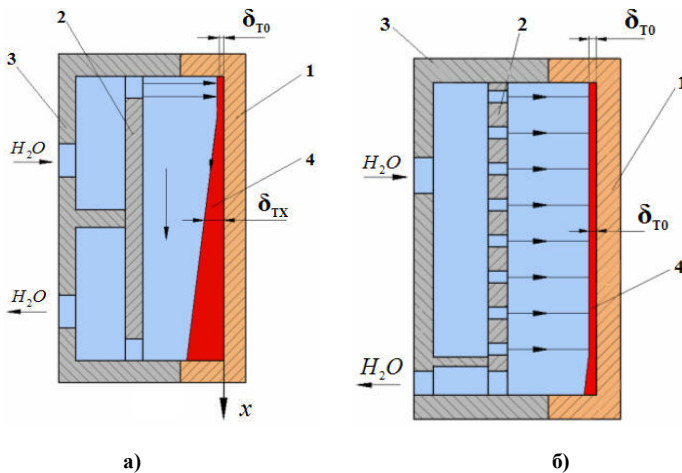
**Четвертая глава** посвящена разработке научно-обоснованных способов литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Разработан способ смешивания жидкого металла и жидко-твердого сплава. Способ основан на разрушении дендритной микроструктуры заэвтектического силумина Al + 40 % Si жидким алюминием и последующим диспергировании кристаллов  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы. В жидко-твердом состоянии структура сплава Al + 40 % Si состоит из дендритов первичной  $\beta_{\text{Si}}$ -фазы и жидкости близэвтектического состава. При воздействии на эту систему перегретым расплавом алюминия происходит разрушение первичных дендритов. В результате они распадаются на более мелкие кристаллы, которые оплавляясь, приобретают компактную округлую форму. При разбавлении жидкости близэвтектического состава расплавом алюминия она кристаллизуется как доэвтектический силумин. В результате вместо обычной эвтектики получается инвертированная, где диспергированные эвтектические зерна изолированы друг от друга зернами  $\alpha$ -фазы. Полученная высокодисперсная инвертированная микроструктура сплава АК18 (Al + 18 % Si) представлена на рисунке 1.

Литье способом смешивания жидкого металла и жидко-твердого сплава является экологически безопасным и универсальным способом получения силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Недостатком способа является относительно малое время живучести процесса литья (30–40 мин).



**Рисунок 1. – Высокодисперсная инвертированная микроструктура литого сплава АК18, полученного смешиванием жидкого алюминия и жидко-твердого сплава Al + 40 % Si при литье в кокиль**

Для ускоренного затвердевания силуминов использован способ затопленно-струйного охлаждения, когда струи охладителя ударяют в охлаждаемую поверхность. Схема способа применительно к кристаллизатору с затопленно-струйной системой охлаждения (струйному кристаллизатору) в сравнении с обычным (щелевым) кристаллизатором представлена на рисунке 2.



**1 – гильза; 2 – экран; 3 – корпус; 4 – тепловой пограничный слой**  
**Рисунок 2. – Схема охлаждения гильзы щелевого (а) и струйного (б) кристаллизаторов**



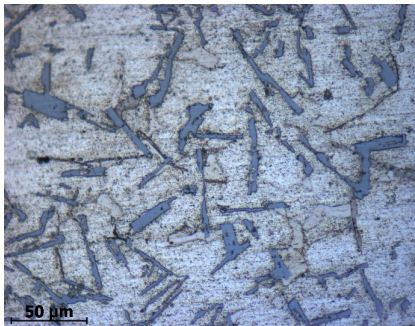
Из теории теплопередачи известно: чем меньше толщина теплового пограничного слоя, тем выше интенсивность теплового потока. Поэтому затопленно-струйный способ охлаждения более эффективный, чем в случае, когда охладитель движется вдоль поверхности охлаждения.

Охлаждающие способности щелевого и струйного кристаллизаторов определяются средними коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  от наружных поверхностей гильз к охладителю. Установлено, что при прочих равных гидравлических параметрах справедливо следующее уравнение:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = 2 \left[ 1 + \frac{k}{\delta_{T0}} \left( \frac{l}{2} \right)^{0,8} \right], \quad (8)$$

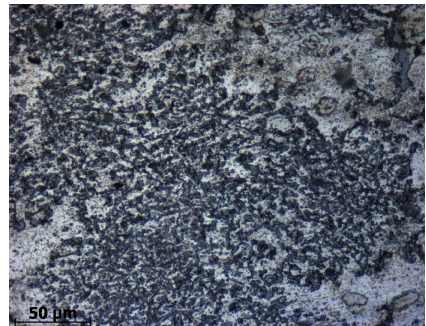
где  $k$  – константа;  $l$  – длина охлаждаемой поверхности щелевого кристаллизатора.

Из уравнения (8) следует, что охлаждающая способность струйного кристаллизатора более чем в два раза выше, чем у щелевого кристаллизатора. Экспериментальным путем установлено, что линейная скорость затвердевания отливок диаметром 100 мм сплава АК12 в струйном кристаллизаторе в среднем в 3 раза выше, чем в щелевом кристаллизаторе. При этом затопленно-струйная система охлаждения обеспечила получение силумина с высокодисперсной инвертированной микроструктурой (рисунок 3). Если в щелевом кристаллизаторе линейная скорость затвердевания силуминов составляет 0,4–0,6 мм/с, то в струйном – 1–2 мм/с, что позволяет получать в структуре отливки глобулярные включения эвтектического кремния дисперсностью 1–3 мкм, а первичного кремния – 15–30 мкм, без применения модификаторов.



x1000

а)

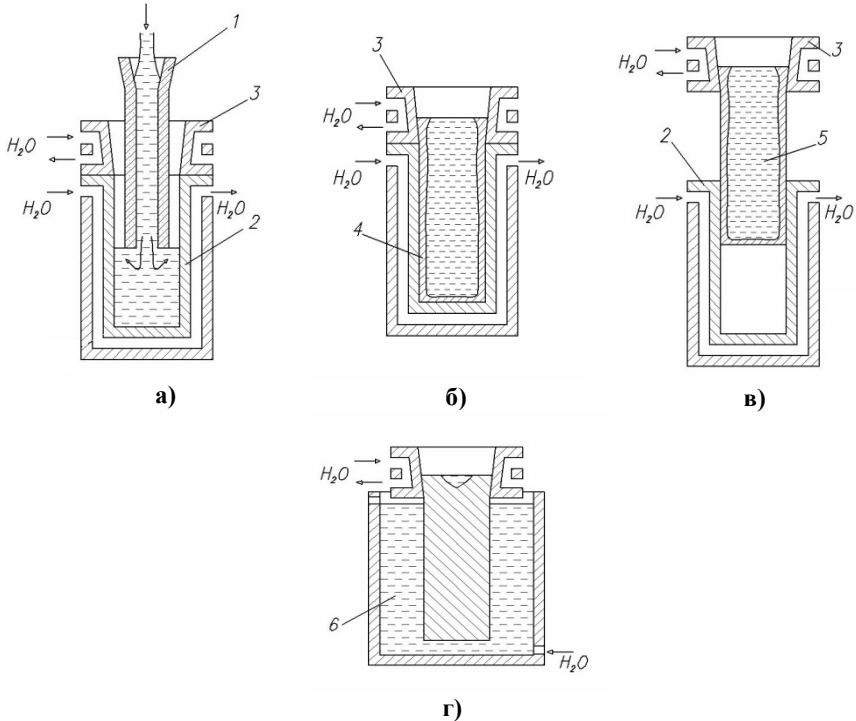


x1000

б)

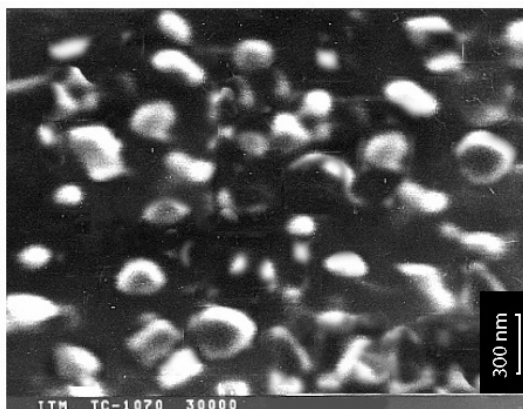
а) – литье в щелевой кристаллизатор; б) – литье в струйный кристаллизатор  
Рисунок 3. – Микроструктура отливок диаметром 100 мм из сплава АК12

Разработан экологически безопасный способ литья закалочным затвердеванием, при котором отливка, для образования начальной корки толщиной 3–8 мм, формируется в кристаллизаторе, затем извлекается из него и охлаждается в закалочной ванне (рисунок 4).



**1** – заливочное устройство; **2** – стационарный кристаллизатор;  
**3** – подвижный кристаллизатор; **4** – стакан; **5** – расплав; **6** – закалочная ванна;  
**а)** – заполнение кристаллизатора; **б)** – формирование стакана;  
**в)** – извлечение стакана с расплавом; **г)** – закалочное затвердевание  
**Рисунок 4.** – Схема литья закалочным затвердеванием

Линейная скорость затвердевания отливок из силуминов при литье закалочным затвердеванием в среднем составляет 4–6 мм/с. Это позволяет получать литые заготовки из сплава АК12 с глобулярными кристаллами  $\beta_{Si}$ -фазы дисперсностью до 0,2 мкм (рисунок 5). Отливки из силуминов, полученные литьем закалочным затвердеванием, в среднем имеют в структуре глобулярные включения эвтектического кремния дисперсностью 0,2–0,6 мкм, а первичного кремния – 10–25 мкм.



**Рисунок 5. – Микроструктура литой заготовки диаметром 50 мм из эвтектического силумина, полученной литьем закалочным затвердеванием**

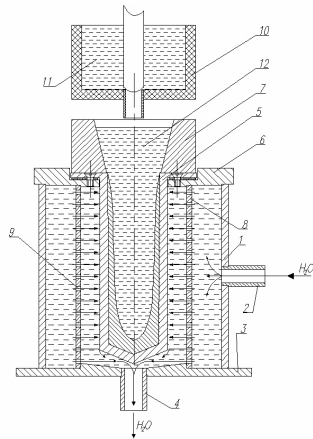
Литье закалочным затвердеванием – наиболее эффективный способ получения силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Использование шихтовых силуминовых отливок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой позволяет осуществить процесс структурно-наследственного модифицирования при литье в кокиль в течение 2–3 ч и получать заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без применения примесных модификаторов. Способом структурно-наследственного модифицирования можно решать технологические проблемы модифицирования структуры отливок из силуминов, значительно повысить их качество, механические и антифрикционные свойства. Кроме этого, способ литья закалочным затвердеванием позволяет получать модифицирующие лигатуры с высокой структурной дисперсностью, что значительно повышает эффективность процесса модифицирования отливок из силуминов и других сплавов.

**Пятая глава** посвящена разработке технологического оборудования для литья ускоренным затвердеванием, используя затопленно-струйный метод охлаждения. Разработано устройство циклического литья цилиндрических сплошных заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой (рисунок 6).

По сути, это устройство с затопленно-струйной системой охлаждения изложницы является глуходонным струйным кристаллизатором с прибыльной надставкой. Для повышения качества отливок из силуминов необходимо использовать вибрацию кристаллизатора.

Разработано устройство с затопленно-струйной системой охлаждения для циклического литья сплошных фасонных заготовок. Полученные отливки из силуминов имели высокодисперсную инвертированную микроструктуру.

Разработаны устройства с затопленно-струйной системой охлаждения для циклического литья ускоренным затвердеванием полых заготовок. Полученные отливки из силуминов имели высокодисперсную инвертированную микроструктуру.



**1 – корпус; 2 – подводящий патрубок; 3 – нижнее основание; 4 – отводящий патрубок; 5 – изложница; 6 – верхнее основание; 7 – прибыльная надставка; 8 – цилиндр; 9 – отверстия; 10 – заливочное устройство; 11 – расплав; 12 – отливка**

**Рисунок 6. – Устройство с затопленно-струйной системой охлаждения изложницы для циклического литья цилиндрических сплошных заготовок**

Разработаны кристаллизаторы для непрерывного литья ускоренным затвердеванием слитков. Для этого использовали способ затопленно-струйного охлаждения рубашки (гильзы) кристаллизатора. Полученные слитки из силуминов имели высокодисперсную инвертированную микроструктуру.

Разработаны устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения слитков, позволяющие повысить производительность литья, равномерность охлаждения и дисперсность микроструктуры.

**Шестая глава** посвящена опытно-промышленному опробованию разработок и их внедрению в производство. Установлено, что заготовки из силумина АК15М3 с высокодисперсной и инвертированной микроструктурой после термообработки по режиму Т5 (выдержка при температуре 520 °С в течение 4 ч, закалка в воде, искусственное старение при температуре 175 °С в течение 6 ч) имеют наиболее высокие механические свойства и фрикционную износостойкость. Микроструктура антифрикционного силумина АК15М3 представлена на рисунке 7.

Антифрикционный силумин АК15М3 имел следующие механические свойства: временное сопротивление разрыву – 350-450 МПа; относительное удлинение – 3–5 %; твердость – 125-135 НВ.

Были проведены сравнительные триботехнические испытания антифрикционного силумина АК12М3 и бронзы БрОСЦ5-5-5 на торцевой машине трения в условиях трения без смазки при нормальной нагрузке 12,8 Н и вращении образца из стали 45 со скоростью 620 об/мин. Установлено, что линейный износ образцов из антифрикционного силумина по стали в 7 раз меньше, чем у аналогичных образцов из бронзы. Испытания на машине трения СМЦ-2 со смазкой И20А при нормальном напряжении

200 Н и вращении со скоростью 300 об/мин показали, что линейный износ образцов из антифрикционного силумина по стали 45 в 23 раза меньше, чем у аналогичных образцов из бронзы. Коэффициент трения скольжения при трении о сталь 45 без смазки у образцов из антифрикционного силумина АК15МЗ в 1,65 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы БрОЦС5-5-5 (рисунок 8).

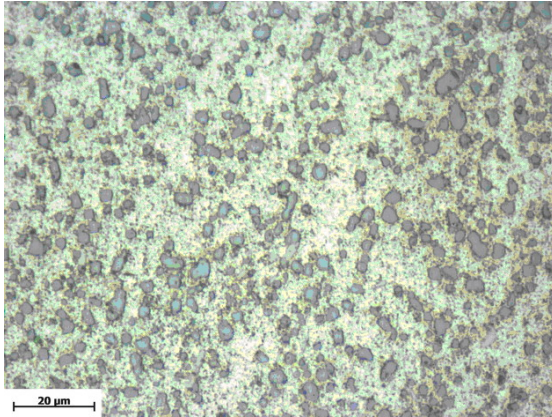
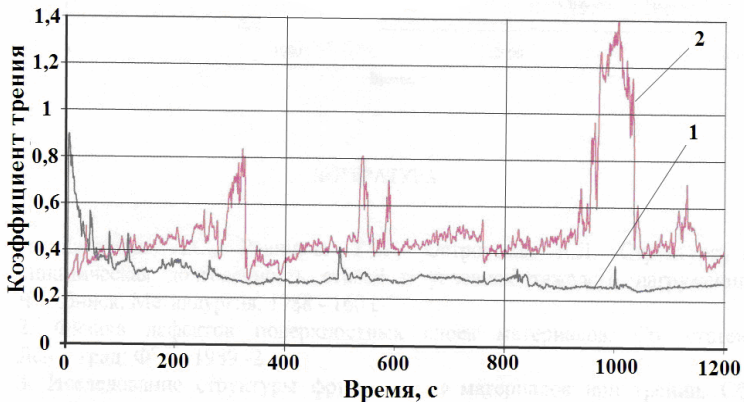
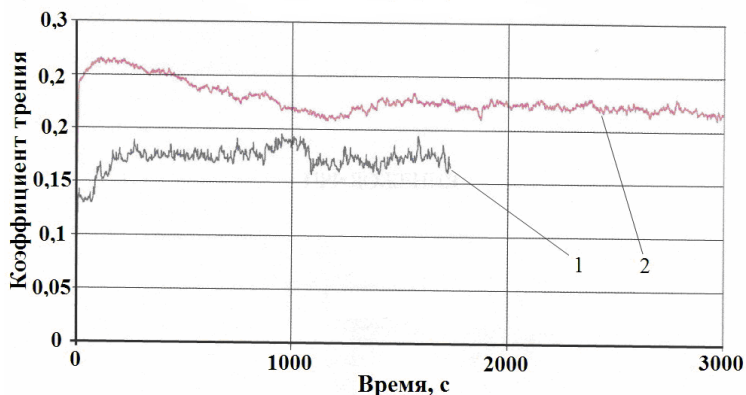


Рисунок 7. – Микроструктура заготовок из антифрикционного силумина АК15МЗ



1 – антифрикционный силумин АК15МЗ; 2 – бронза БрОЦС5-5-5  
Рисунок 8. – График изменения коэффициента трения от времени при трении о сталь без смазки

В условиях смазки (И20А) коэффициент трения по стали 45 у образцов из антифрикционного силумина в 1,35 раз ниже, чем у аналогичных образцов из бронзы БрОЦС5-5-5 (рисунок 9).



**1 – антифрикционный силумин АК15МЗ; 2 – бронза БрОЦС5-5-5**  
**Рисунок 9. – График изменения коэффициента трения от времени при трении о сталь в условиях смазки (И20А)**

При испытании на машине трения МТВП установлено, что антифрикционный силумин АК15МЗ при трении по стали 45 в условиях удельных нагрузок до 100 МПа превосходит дорогостоящие антифрикционные бронзы БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1, БрАЖ9-4.

Разработан силуминовый модификатор СМ-1 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, содержащий 16–18 % кремния, 4–6 % магния, 0,4–0,6 % кальция и титана. СМ-1 является легкоплавким, экологически безопасным универсальным модификатором черных и цветных сплавов.

Разработан силуминовый модификатор СМ-2 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой и следующим химическим составом: Al – основа; Si – 6–8 %; Mg – 4 %. СМ-2, добавленный в количестве 0,1 % от веса жидкой стали 35Л вместо раскислителя на ОАО «Белорусский автомобильный завод», измельчал микроструктуру отливок, по сравнению с серийными, в 3–4 раза, увеличивал твердость на 20 %, повышал временное сопротивление разрыву и предел текучести испытываемых стальных образцов соответственно на 11 % и 12 %.

Детали из антифрикционного силумина прошли опытно-промышленные испытания на 20-ти промышленных предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации. Опытные детали устанавливались в узлах трения машин и механизмов вместо аналогичных деталей из серийных промышленных бронз типа БрАЖ, БрОЦС, БрАЖМц, БрАЖН, БрОФ, БрОС. Установлено, что детали из антифрикционного силумина по фрикционной износостойкости и (или) ресурсу работы не уступают либо превосходят аналогичные детали из серийных промышленных антифрикционных бронз.

На базе ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» создан опытно-промышленный литейный участок по производству сплошных и полых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Их получают на установке циклического литья, установке непрерывного горизонтального литья, установке вертикального центробежного литья и при литье в кокиль (рисунок 10).



а)



б)



в)

а) установка циклического литья; б) установка непрерывного горизонтального литья; в) установка вертикального центробежного литья  
 Рисунок 10. – Установки для опытно-промышленного литья заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой

Заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой поставлялись более чем на 100 предприятий Республики Беларусь, Российской Федерации, Кореи и Украины. Заготовки из антифрикционного силумина поставляются по ТУ ВУ 700002421.003-2011. За семь лет (2012–2019 гг.) отправлено продукции на сумму, эквивалентную 140 000 долларов США. Реальный экономический эффект предприятий за семилетний период только от замены бронзовых заготовок на заготовки из антифрикционного силумина составляет в эквиваленте более 1050 тысяч долларов США.

Результаты диссертационной работы внедрены с годовым экономическим эффектом на сумму свыше 370 тысяч долларов США. Кроме этого, общий объем привлеченной валюты в Республику Беларусь по результатам диссертационной работы составил более 200 тысяч долларов США.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате проведенных термодинамических расчетов структуры металлических расплавов и процессов их кристаллизации впервые было установлено: основными структурными элементами металлических расплавов являются нанокристаллы кристаллизующихся фаз; плавление металлов и сплавов – это процесс распада их микроструктуры на центры кристаллизации, нанокристаллы и атомы; металлические расплавы – равновесные двухфазные системы, состоящие из нанокристаллов и атомов, которые образуют бесструктурную зону (атомный газ); нанокристаллы термодинамически стабильны в металлических расплавах; при кристаллизации фаз основными строительными элементами являются нанокристаллы; центры кристаллизации образуются путем коагуляции нанокристаллов; дендритные кристаллы формируются из центров кристаллизации путем последовательного присоединения нанокристаллов по дендритному механизму, при этом удельная межфазная поверхностная энергия центра кристаллизации и элементов роста дендритного кристалла линейно зависит от их радиусов кривизны [1-А, 29-А, 30-А, 60-А, 94-А, 101-А, 103-А, 104-А, 109-А, 110-А, 115-А, 121-А, 126-А, 127-А, 129-А, 134-А, 135-А].

2. Впервые, используя термодинамические уравнения, показано: при затвердевании металлических расплавов пузырьки водорода формируются на хорошо смачивающихся межфазных поверхностях, блокируя рост кристаллизующихся фаз; при кристаллизации эвтектики силуминов пузырьки водорода в основном будут выделяться на кристаллах  $\alpha$ -фазы, поскольку она лучше смачивается расплавом, чем  $\beta_{Si}$ -фаза; неметаллические включения и интерметаллиды играют косвенную роль при кристаллизации сплавов, адсорбируя своими поверхностями поверхностно-активные элементы, которые отрицательно влияют на формирование центров кристаллизации фаз и развитие кристаллов [1-А, 23-А, 25А–27-А, 45-А, 55-А, 59-А, 62-А, 95-А, 107-А, 159-А, 160-А].

3. Впервые разработаны следующие физико-химические принципы и механизмы модифицирования микроструктуры силуминов: коагуляционный принцип образования центров кристаллизации из нанокристаллов фаз; рафинировочный принцип удаления адсорбированных атомов кислорода и водорода как демодифицирующих элементов; деблокировочный принцип выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах фаз; роль модификаторов первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы сводится к активному поглощению растворенного в расплаве водорода и рафинированию центров кристаллизации от адсорбированных атомов водорода; роль фосфора, растворенного в жидком силумине, сводится к рафинированию центров кристаллизации первичных кристаллов  $\beta_{Si}$ -фазы от адсорбированного кислорода; роль модификаторов эвтектики сводится к предотвращению выделения пузырьков водорода на кристаллах фаз, что способствует их разветвлению и получению модифицированной эвтектической микроструктуры; высокая скорость затвердевания силуминов препятствует дендритной кристаллизации  $\beta_{Si}$ -фазы и способствует получению высокодисперсной инвертированной микроструктуры [1-А, 31-А–34-А, 43-А, 48-А, 60-А, 89-А, 93-А, 96-А, 102-А, 106-А, 107-А, 115-А–117-А, 123-А–125-А, 128-А, 130-А, 151-А, 198-А, 202-А].

4. Впервые разработаны следующие способы литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без применения примесных модификаторов: способ смешивания жидкого металла и жидко-твердого сплава, основанный на разрушении дендритной микроструктуры заэвтектического силумина  $Al + 40 \% Si$  жидким алюминием и последующим диспергировании кристаллов  $\beta_{Si}$ -фазы; способы литья с использованием устройств и кристаллизаторов с затопленно-струйной системой охлаждения для ускоренного затвердевания отливок; способ литья закалочным затвердеванием, при котором структура отливок в основном (кроме начальной корки толщиной 3–8 мм) формируется в закалочной ванне, что позволяет диспергировать кристаллы  $\beta_{Si}$ -фазы силуминов до 0,2 мкм и получать модифицирующие лигатуры с высокой структурной дисперсностью; способ структурно-наследственного модифицирования, основанный на использовании шихты из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой [1-А–16-А, 18-А–22-А, 24-А, 28-А, 35-А–37-А, 41-А, 42-А, 44-А, 50-А–53-А, 58-А, 65-А, 70-А–75-А, 77-А, 78-А, 80-А, 82-А, 85-А, 86-А, 90-А, 91-А, 93-А, 105-А, 108-А, 115-А, 117-А, 136-А–145-А, 147-А, 148-А, 152-А–155-А, 157-А, 161-А–165-А, 168-А, 171-А–175-А, 179-А–181-А, 188-А, 191-А, 192-А, 194-А, 196-А, 201-А, 205-А, 206-А, 208-А–210-А, 212-А–215-А, 217-А, 218-А, 222-А–226-А, 229-А, 234-А, 259-А, 261-А, 262-А, 325-А–327-А, 329-А].

5. Установлено, что силумин АК15МЗ с высокодисперсной инвертированной микроструктурой после термообработки по режиму Т5 имел высокие механические свойства, а по фрикционной износостойкости в условиях удельных нагрузок до 100 МПа превосходил дорогостоящие промышленные антифрикционные бронзы БрОЦС5-5-5, БрОФ10-1 и БрАЖ9-4. Впервые разработан силуминовый модификатор СМ-1 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, содержащий 16–18 % кремния, 4–6 % магния, 0,4–0,6 % кальция и титана, который является легкоплавким, экологически безопасным универсальным силуминовым модификатором отливок из черных и цветных сплавов. Впервые разработан силуминовый модификатор СМ-2 с высокодисперсной инвертированной микроструктурой и следующим химическим составом: Al – основа; Si – 6–8 %; Mg – 4 %. Этот модификатор, добавленный в количестве 0,1 % от веса жидкой стали 35Л вместо раскислителя на ОАО «Белорусский автомобильный завод», измельчал микроструктуру отливок, по сравнению с серийными, в 3–4 раза, увеличивал твердость на 20 %, повышал временное сопротивление разрыву и предел текучести испытываемых стальных образцов соответственно на 11 % и 12 % [38-А, 39-А, 40-А, 46-А, 47-А, 49-А, 54-А, 56-А, 57-А, 61-А, 63-А, 64-А, 66-А, 69-А, 76-А, 79-А, 81-А, 83-А, 114-А, 122-А, 146-А, 149-А, 150-А, 156-А, 158-А, 166-А, 167-А, 169-А, 176-А, 182-А, 183-А, 187-А, 195-А, 200-А, 211-А, 216-А, 219-А–221-А, 227-А, 228-А, 284-А, 292-А, 313-А, 320-А, 328-А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Детали из антифрикционного силумина АК15МЗ прошли опытно-промышленные испытания на 20-ти предприятиях: ОАО «Завод «Оптик» (Беларусь), ЧП «ВС–Техника» (Беларусь), заводе «Могилевтрансмаш» ОАО «МАЗ» (Беларусь), РУПП «Станкозавод «Красный борец» (Беларусь). РУП «Завод «Эвистор» (Беларусь), ОАО «Гомельский завод станочных узлов» (Беларусь),

ОАО «Бобруйскагромаш» (Беларусь), ОАО «Белшина» (Беларусь), ОАО «Кузлитмаш» (Беларусь), ОАО «Амкодор–Дзержинск» (Беларусь), ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (Россия), ОАО «БЕЛАЗ – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ» (Беларусь), ОАО «Светлогорск - Химволокно» (Беларусь), ПАО «Таганрогский металлургический завод» (Россия), ООО «ТМК– ИНОКС» (Россия), АО «НЛМК - Урал» (Россия), ООО «СтанкоПромСервис» (Россия), ОАО «Витебскиф» (Беларусь), ОАО «Минский завод колесных тягачей» (Беларусь), АО «ТМК НЕФТЕГАЗСЕРВИС - НИЖНЕВАРТОВСК» (Россия). Опытные детали устанавливались в узлах трения машин и механизмов вместо аналогичных деталей из серийных бронз типа БрАЖ, БрОЦС, БрАЖМц, БрАЖН, БрОФ, БрОС. Установлено, что детали из антифрикционного силумина по износостойкости и (или) ресурсу работы не уступают либо превосходят аналогичные детали из алюминиевых и оловянных бронз [3-А, 117-А, 120-А, 121-А, 170-А, 177-А, 178-А, 183-А, 185-А, 186-А, 189-А, 193-А, 195-А, 197-А, 200-А, 204-А, 207-А].

2. На базе ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» создан опытно-промышленный литейный участок по производству сплошных и полых заготовок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Их получают на установке циклического литья, установке непрерывного горизонтального литья, установке вертикального центробежного литья и при литье в кокиль. Заготовки из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой поставлялись более чем на 100 предприятий Республики Беларусь, Российской Федерации, Кореи и Украины. Заготовки из антифрикционного силумина поставляются по ТУ ВУ 700002421.003-2011. За семь лет (2012–2019 гг.) отправлено продукции на сумму эквивалентную 140 000 долларов США. Реальный экономический эффект только от замены бронзовых заготовок на заготовки из антифрикционного силумина составляет в эквиваленте более 1050 тысяч долларов США [79-А, 87-А, 88-А, 92-А, 97-А–100-А, 119-А–121-А, 170-А, 177-А, 178-А, 184-А–186-А, 189-А, 190-А, 193-А, 197-А, 203-А, 204-А, 207-А, 230-А].

3. Разработано следующее технологическое оборудование для литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой: устройства с затопленно-струйной системой охлаждения для циклического литья ускоренным затвердением сплошных и полых заготовок; кристаллизаторы для непрерывного литья ускоренным затвердением, используя метод затопленно-струйного охлаждения рубашки кристаллизатора; устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения слитков, позволяющие повысить производительность литья, равномерность охлаждения и дисперсность их микроструктуры [52-А, 231-А–233-А, 235-А–258-А, 260-А, 263-А–283-А, 285-А–291-А, 293-А–312-А, 314-А–319-А, 321-А–324-А, 330-А].

4. Разработанные способы литья и оборудование для получения отливок из силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой применимы к многим сплавам, которые в литом состоянии имеют низкие механические и технологические свойства. Инвертирование и высокое диспергирование микроструктуры сплавов позволит получать отливки с новыми высокотехнологическими свойствами, которые востребованы современной промышленностью.

5. В настоящее время при литье силуминов в основном используется плохая структурная наследственность. Применяемые силуминовые шихтовые материалы (чущковые слитки и возврат) имеют, как правило, крупнокристаллическую микро-

структуру, которая при переплаве наследуется получаемыми отливками. Поэтому применяется примесное модифицирование, но они создают серьезные технологические проблемы, связанные с экологической безопасностью, гидроусадочной пористостью отливок, недостаточной модифицированностью и перемодифицированностью их микроструктуры, насыщением расплава оксидом алюминия. Решить эти проблемы можно методом структурно-наследственного модифицирования. Для этого в качестве шихтовых материалов необходимо использовать силумин с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Если его добавить в шихту или расплав в количестве более 20 %, то получаются отливки с модифицированной микроструктурой и минимальной газоусадочной пористостью. Живучесть процесса структурно-наследственного модифицирования в обычных условиях литья составляет 2–3 часа. Производительность процесса циклического литья сплошных заготовок диаметром 100 мм и высотой 300 мм, используя затопленно-струйный метод охлаждения двух гильз глухонных кристаллизаторов, составляет в среднем 3 т/ч. Это позволяет обеспечить необходимыми шихтовыми силуминовыми отливками с высокодисперсной инвертированной микроструктурой любой литейный цех и решить основные технологические проблемы модифицирования микроструктуры отливок из силуминов.



**Список публикаций соискателя ученой степени****Монографии**

1. Марукович, Е.И. Модифицирование сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 192 с.
2. Марукович, Е.И. Ускоренное затвердевание силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Современные литейные технологии: монография / Н.К. Толочко [и др.]; под ред. Н.К. Толочко и А.С. Калиниченко. – Минск: Беларус. гос. аграрн. техн. ун-т, 2009. – Гл. 3. – С. 61–74.
3. Марукович, Е.И. Силумин с глобулярным кремнием. Получение, свойства, применение / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т. 1 / В.А. Андреев [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Гл. 5. – С. 70–79.

**Препринты**

4. Лаптинский, В.Н. Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье. Часть I / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – 42 с. (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси, Инт-т технол. металлов; № 15).
5. Лаптинский, В.Н. Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье. Часть VI / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – 27 с. (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т технол. металлов; № 26).
6. Лаптинский, В.Н. Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье. Часть VII / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – 41 с. (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т технол. металлов; № 29).
7. Марукович, Е.И. Конструктивный метод анализа задачи о ламинарном пограничном слое и его применение к расчету охлаждающей способности кристаллизаторов при непрерывном литье. Часть VIII / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. – 22 с. (Препринт / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т технол. металлов; № 30).

**Статьи в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов**

8. Марукович, Е.И. Литье заэвтектических силуминов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2000. – № 4. – С. 54–55.
9. Марукович, Е.И. Особенности структурообразования при литье заэвтектического силумина с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.М. Брановицкий // Литье и металлургия. – 2001. – № 4. – С. 40–42.

10. Марукович, Е.И. Получение литых сплавов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2001. – № 4. – С. 36–39.

11. Марукович, Е.И. Перспективы применения силуминов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2002. – № 4. – С. 44–46.

12. Марукович, Е.И. Термовременные параметры и структура заготовок для тиксолития заэвтектических силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.А. Радько // *Литье и металлургия*. – 2002. – № 4. – С. 47–48.

13. Марукович, Е.И. Получение отливок из силуминов с наноструктурным эвтектическим кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.А. Радько // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 3. – С. 82.

14. Стеценко, В.Ю. Модифицирование сплава АК12М2 без применения модифицирующих флюсов и лигатур / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько, С.В. Карпионов // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 2 (30). – С. 129–130.

15. Марукович, Е.И. Диспергирование первичной фазы антифрикционных сплавов легированием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 2 (30). – С. 167–169.

16. Марукович, Е.И. Улучшение структурной наследственности поршней заэвтектических силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 2 (30). – С. 159–161.

17. Марукович, Е.И. Повышение эффективности работы кристаллизатора при непрерывном литье слитков / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2 (34). – Ч. 1. – С. 139–141.

18. Марукович, Е.И. Получение отливок из заэвтектического силумина методом литья закалочным затвердеванием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2 (34). – С. 142–144.

19. Стеценко, В.Ю. Улучшение структурной наследственности поршней из доэвтектического силумина АК5М7 / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2 (34). – С. 127–128.

20. Стеценко, В.Ю. Повышение эффективности охлаждения отливок из силуминов при литье закалочным затвердеванием / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько, С.А. Харьков, Джонг–Хун Ли, Ки–Йонг Чой // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2 (38). – С. 128–129.

21. Стеценко, В.Ю. Литье силуминов в кокиль со струйной системой охлаждения / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2 (38). – С. 136–138.

22. Марукович, Е.И. Повышение эффективности модифицирования / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2 (38). – С. 151–153.

23. Марукович, Е.И. Влияние кривизны межфазных границ на процессы кристаллизации в металлах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 4 (40). – С. 91–100.

24. Марукович, Е.И. Активизация процессов модифицирования металлов и сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство*. – 2006. – № 11. – С. 2–6.

25. Стеценко, В.Ю. Термодинамика зародышеобразования при кристаллизации металлов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия: Республ. межвед. сб. научн. тр.* – Минск : Беларуская наука, 2006. – Вып. 30. – С. 84–99.

26. Марукович, Е.И. Устойчивость нанокристаллов в расплавах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия.* – 2007. – № 2 (42). – С. 146–149.

27. Стеценко, В.Ю. О зародышеобразовании при затвердевании металлов / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // *Металлургия машиностроения.* – 2007. – № 1. – С. 32–37.

28. Марукович, Е.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов без модификаторов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, Ки-Йонг Чой // *Металлургия машиностроения.* – 2007. – № 3. – С. 37–40.

29. Марукович, Е.И. Термодинамика нанокристаллов в расплавах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.–тэхн. навук.* – 2007. – № 4. – С. 5–12.

30. Стеценко, В.Ю. Кристаллизация и плавление нанокристаллов в жидких металлах / В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения.* – 2007. – № 6. – С. 18–21.

31. Стеценко, В.Ю. О механизмах модифицирования силуминов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения.* – 2008. – № 1. – С. 20–23.

32. Стеценко, В.Ю. О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 1 (45). – С. 149–150.

33. Стеценко, В.Ю. О модифицировании заэвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 1 (45). – С. 151–154.

34. Стеценко, В.Ю. Физико-химические механизмы модифицирования алюминиево-кремниевых сплавов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр.* – Минск : БНТУ, 2008. – Вып. 31. – С. 151–159.

35. Стеценко, В.Ю. Универсальный модифицирующий сплав системы Al – Ti – Sb для литья силуминов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, С.В. Покаместов // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 102–104.

36. Стеценко, В.Ю. Влияние профилирования наружной поверхности гильзы струйного кристаллизатора на затвердевание отливок из силуминов / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 108–109.

37. Стеценко, В.Ю. Литье силуминов в струйный кристаллизатор с силуминовой гильзой / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 110–111.

38. Стеценко, В.Ю. Влияние мелкокристаллического силуминового модификатора на микроструктуру отливок из чугунов / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, А.И. Ривкин // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 112–113.

39. Стеценко, В.Ю. Применение силуминового модификатора при литье медных сплавов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, Д.А. Мешков // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 114–116.

40. Стеценко, В.Ю. Модифицирование силуминов силуминовыми модификаторами / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, А.И. Ривкин // *Литье и металлургия.* – 2008. – № 3 (48). – С. 117–118.

41. Стеценко, В.Ю. Разработка математической модели затвердевания отливки АК18 в струйном кристаллизаторе / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3 (48). – С. 150–152.

42. Стеценко, В.Ю. Расчет затвердевания отливки АК12 в устройстве затопленно-струйного охлаждения / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, Р.В. Коновалов // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3 (48). – С. 218–219.

43. Марукович, Е.И. Модифицирование сплавов. Состояние, проблемы / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2008. – № 4. – С. 56–61.

44. Стеценко, В.Ю. Элементы структурной наследственности при затвердевании металлов и сплавов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2008. – № 6. – С. 19–21.

45. Стеценко, В.Ю. О зарождении газовых пузырьков в процессе кристаллизации фаз металлов и сплавов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2008. – № 3. – С. 28–30.

46. Стеценко, В.Ю. Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор для чугунов и медных сплавов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. – 2009. – № 1. – С. 7–10.

47. Стеценко, В.Ю. Модифицирование силуминов мелкокристаллическими алюминиевыми сплавами / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, Р.В. Коновалов // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. – 2009. – № 1. – С. 3–6.

48. Стеценко, В.Ю. О механизме модифицирования структуры сплавов при их затвердевании / В.Ю. Стеценко // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – № 3. – С. 42–46.

49. Стеценко, В.Ю. Новый антифрикционный силумин АК15М3 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 114–115.

50. Стеценко, В.Ю. Непрерывное горизонтальное литье в струйный кристаллизатор слитков диаметром 70 мм из силумина АК18 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов, Suk-Bong Kang // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 116–117.

51. Стеценко, В.Ю. Непрерывное горизонтальное литье в струйный кристаллизатор слитков диаметром 70 мм из силумина АК12 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов, Suk-Bong Kang // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 118–119.

52. Стеценко, В.Ю. Определение рациональной конструкции устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения / В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 120–121.

53. Марукович, Е.И. Расчет затвердевания отливки АК12 в струйном кристаллизаторе и устройстве затопленно-струйного вторичного охлаждения / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов, А.И. Ривкин // *Весці НАНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2009. – № 3. – С. 5–8.

54. Marukovich, E.I. Specially prepared silumins with the modified structure / E.I. Marukovich, V.Y. Stetsenko // *Высокоэнергетическая обработка материалов. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ART – ПРЕСС, 2009. – С. 126–136.*



55. Стеценко, В.Ю. Об основополагающем принципе теории модифицирования сплавов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 4 (53). – С. 68–71.

56. Марукович, Е.И. Модифицирование сплавов структурно-высокодисперсными силуминами / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия : Республ. межведом. сб. научн. тр.* – Минск : БНТУ, 2009. – Вып. 32. – С. 75–83.

57. Marukovich, E.I. Structurally-superfine silumins for modifying of alloys / E.I. Marukovich, V.Y. Stetsenko // *Scientific Israel – Technological Advantages*. – 2009. – Vol. 11. – № 3. – С. 101–108.

58. Стеценко, В.Ю. Исследование влияния диаметра отливки на скорость ее затвердевания и микроструктуру при затопленно-струйном охлаждении / В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов, А.И. Ривкин // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 4 (53). – С. 34–38.

59. Стеценко, В.Ю. Влияние образования пузырьков водорода при затвердевании силуминов на микроструктуру отливок / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 4 (53). – С. 64–67.

60. Стеценко, В.Ю. Механизм плавения и кристаллизации металлов и сплавов / В.Ю. Стеценко // *Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр.* – Минск : БНТУ, 2009. – Вып. 32. – С. 104–112.

61. Марукович, Е.И. Модифицированный силуминовый модификатор для непрерывной разливки стали на МНЛЗ / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин // *Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода, 2001–2008 гг. В 3 т. Т. 3. Электро-сталеплавильное производство*, под ред. Д.М. Кукуя, Н.В. Андрианова, В.А. Маточкина. – Минск: Тэхнолoгiя, 2009. – С. 35–37.

62. Стеценко, В.Ю. Влияние водорода на формирование структуры сплавов при затвердевании отливок / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 1 (54). – С. 128–130.

63. Стеценко, В.Ю. Использование структурно-высокодисперсных модификаторов для обработки сплавов черных и цветных металлов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 31–35.

64. Стеценко, В.Ю. Влияние структурной дисперсности и содержание меди на фрикционную износостойкость эвтектического антифрикционного силумина АК15 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, К.Н. Баранов // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 59–61.

65. Стеценко, В.Ю. Получение деформируемых слитков из заэвтектического силумина / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.А. Сидорский // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 55–56.

66. Стеценко, В.Ю. Влияние силуминового раскислителя-модификатора на структуру стальных слитков / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, В.В. Новиков // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 75–78.

67. Стеценко, В.Ю. Применение антифрикционного алюминиево-кремниевого сплава / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 82–83.

68. Стеценко, В.Ю. Влияние сорбции и десорбции водорода и кислорода на процессы модифицирования и кристаллизации сплавов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 91–96.

69. Марукович, Е.И. Свойства и получение антифрикционного силумина / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Технологии литья и металлургии: к 40летию Института технологии металлов НАН Беларуси / редкол. : Е.И. Марукович (отв. ред.), О.О. Станюленис, Е.М. Патук. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С. 67–72.

70. Стеценко, В.Ю. Технология наследственного модифицирования силуминов / В.Ю. Стеценко // Технологии литья и металлургии: к 40летию Института технологии металлов НАН Беларуси / редкол. : Е.И. Марукович (отв. ред.), О.О. Станюленис, Е.М. Патук. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С. 145–150.

71. Стеценко, В.Ю. Модифицирование сплавов ускоренным затвердеванием / В.Ю. Стеценко // Технологии литья и металлургии: к 40летию Института технологии металлов НАН Беларуси / редкол.: Е.И. Марукович (отв. ред.), О.О. Станюленис, Е.М. Патук. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С. 161–168.

72. Лаптинский, В.Н. Анализ охлаждающей способности струйного кристаллизатора / В.Н. Лаптинский, В.Ю. Стеценко // Технологии литья и металлургии: к 40летию Института технологии металлов НАН Беларуси / редкол. : Е.И. Марукович (отв. ред.), О.О. Станюленис, Е.М. Патук. – Минск: Беларус. навука, 2010. – С. 98–106.

73. Стеценко, В.Ю. Влияние газового зазора на эффективность охлаждения и микроструктуру отливок при литье силуминов в металлическую водоохлаждаемую форму / В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 44–46.

74. Стеценко, В.Ю. Непрерывное литье эвтектических структурно-высокодисперсных слитков из силуминов без применения примесных модификаторов / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Suk-Bong Kang // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 13–15.

75. Стеценко, В.Ю. Экологически безопасное непрерывное литье заэвтектических мелкокристаллических слитков / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Suk-Bong Kang // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 19–21.

76. Стеценко, В.Ю. Определение рационального состава и концентрации высокодисперсного алюминиевого модификатора для модифицирования структуры сплава АК18 / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 25–27.

77. Марукович, Е.И. Улучшение структурной наследственности – резерв повышения свойств силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (57). – С. 16–18.

78. Лаптинский, В.Н. Расчет динамического и теплового пограничных слоев для оценки охлаждающей способности кристаллизаторов / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 4 (29). – С. 75–83.

79. Стеценко, В.Ю. Центробежное литье антифрикционного силумина / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев // Литейное производство. – 2011. – № 2. – С. 24–25.

80. Стеценко, В.Ю. Получение деформируемых слитков из заэвтектического силумина / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.А. Сидорский // Металлургия машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 10–11.

81. Стеценко, В.Ю. Повышение фрикционной износостойкости алюминиево-кремниевых сплавов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2011. – № 1. – С. 41–45.

82. Стеценко, В.Ю. Непрерывное горизонтальное литье без модификаторов мелкокристаллических слитков из алюминиево-кремниевых сплавов / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2011. – № 1. – С. 46–50.

83. Marukovich, E.I. Properties and application of antifriction silumin / E.I. Marukovich, V.Y. Stetsenko // Литье и металлургия. – 2011. – № 2. – С. 51–53.

84. Марукович, Е.И. Управление теплоотводом – новые возможности литья заготовок / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин // Инженер–механик. – 2011. – № 3. – С. 11–17.

85. Марукович, Е.И. Исследование охлаждающей способности затопленной струи охладителя / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (62). – С. 17–18.

86. Марукович, Е.И. Определение возможности литья в струйный кристаллизатор биметаллической отливки «Сталь – антифрикционный силумин» / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, В.В. Новиков // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (62). – С. 22–23.

87. Марукович, Е.И. Исследование литья полых заготовок из силумина АК18 методом намораживания на водоохлаждаемом стержне / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (62). – С. 65–67.

88. Стеценко, В.Ю. Влияние тепловых и гидродинамических параметров литья на свойства заготовок, полученных намораживанием на водоохлаждаемом стержне / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, В.В. Новиков // Литье и металлургия. – 2011. – № 3 (62). – С. 19–21.

89. Стеценко, В.Ю. Механизмы воздействия атмосферных газов на модифицирование и кристаллизацию сплавов / В.Ю. Стеценко // Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр. – Минск : БНТУ, 2011. – Вып. 33. – С. 158–171.

90. Борухов, В.Т. Определение коэффициентов теплоотдачи в процессе затвердевания отливки в струйном кристаллизаторе / В.Т. Борухов, Г.М. Заяц, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85. – № 1. – С. 181–187.

91. Стеценко, В.Ю. Исследование влияния конструкции стержней на их охлаждающую способность при намораживании силуминов методом численного моделирования / В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов, К.Н. Баранов // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 63–68.

92. Стеценко, В.Ю. Получение полых заготовок диаметром 150 мм из силуминов намораживанием на стальном водоохлаждаемом стержне / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (67). – С. 98–100.

93. Стеценко, В.Ю. Новые принципы и эффективные способы модифицирования сплавов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2012. – № 4 (68). – С. 126–129.

94. Стеценко, В.Ю. Механизмы процесса кристаллизации металлов и сплавов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2013. – № 1 (69). – С. 48–54.

95. Стеценко, В.Ю. Термодинамика процесса выделения водорода при затвердевании металлов и сплавов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 1 (69). – С. 55–60.

96. Стеценко, В.Ю. Определение механизмов литья алюминиево-кремниевых сплавов с высокодисперсной и инвертированной микроструктурой / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 2 (70). – С. 23–29.

97. Стеценко, В.Ю. Способ охлаждения отливок из силумина АК15М3 при вертикальном центробежном литье / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, А.П. Гутев // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3 (71). – С. 116–117.

98. Стеценко, В.Ю. Влияние охлаждения изложницы на структуру отливок силумина АК15М3 при вертикальном центробежном литье / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, Р.В. Коновалов // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3 (72). – С. 118–120.

99. Стеценко, В.Ю. Влияние гравитационного коэффициента на структуру центробежных отливок из силумина АК18 / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, В.В. Новиков // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3 (72). – С. 125–127.

100. Марукович, Е.И. Влияние охлаждения отливок из заэвтектического силумина на их структуру при вертикальном центробежном литье / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.–тэхн. навук*. – 2013. – № 4. – С. 28–31.

101. Стеценко, В.Ю. Металлические расплавы – наноструктурные системы / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 1 (74). – С. 48–49.

102. Стеценко, В.Ю. Влияние параметров кристаллизации на модифицирование сплава / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2 (79). – С. 14–16.

103. Стеценко, В.Ю. Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2 (79). – С. 33–35.

104. Стеценко, В.Ю. Наноструктурные процессы плавления, кристаллизации и модифицирования металлов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3 (80). – С. 51–53.

105. Стеценко, В.Ю. Модифицирование вторичных сплавов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3 (80). – С. 54–56.

106. Стеценко, В.Ю. Наноструктурные процессы плавки и литья доэвтектического силумина / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 1 (82). – С. 11–13.

107. Стеценко, В.Ю. Основные проблемы современного модифицирования сплавов. Пути решения / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2 (83). – С. 10–13.

108. Марукович, Е.И. Основные проблемы литья силуминов. Пути решения / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3 (84). – С. 28–30.

109. Стеценко, В.Ю. Термодинамика и наноструктурные механизмы процессов плавления и кристаллизации металлов / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3 (84). – С. 45–48.

110. Марукович, Е.И. Основные трудности современной теории кристаллизации металлических расплавов. Пути преодоления / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3 (84). – С. 24–27.

111. Стеценко, В.Ю. Наноструктурные процессы плавки и литья эвтектического силумина / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3 (84). – С. 20–23.
112. Стеценко, В.Ю. Заэвтектический силумин. Наноструктурные процессы плавки и литья / В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 4 (86). – С. 19–22.
113. Марукович, Е.И. Непрерывное горизонтально литье и свойства антифрикционного силумина / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 20016. – № 5. – С. 32–34.
114. Марукович, Е.И. Литье силумина. Новые подходы / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейщик России*. – 2016. – № 8. – С. 20–24.
115. Марукович, Е.И. Плавка и литье силуминов – наноструктурные процессы / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2017. – № 2. – С. 24–28.
116. Марукович, Е.И. Силумин с глобулярным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // *Наука и инновации*. – 2017. – № 4. – С. 9–11.
117. Марукович, Е.И. Наноструктурные процессы при плавке и литье силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2017. – № 2. – С. 15–22.
118. Марукович, Е.И. Вертикальное центробежное литье заэвтектического силумина при охлаждении литейной формы и отливки / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 2 (87). – С. 5–11.
119. Марукович, Е.И. Производство и применение силумина с глобулярным кремнием / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 2 (87). – С. 15–19.
120. Марукович, Е.И. Силумин с глобулярным кремнием – перспективный материал для промышленности / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство*. – 2017. – № 9. – С. 6–8.
121. Марукович, Е.И. Наноструктуризация в литейных процессах / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 4 (89). – С. 68–71.
122. Марукович, Е.И. Исследование триботехнических свойств литейного силумина АК15М3 / Е. И. Марукович, В.А. Кукареко, В.Ю. Стеценко, В. Чекулаев, П.Г. Сухоцкий // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 1 (90). – С. 7–11.
123. Марукович, Е.И. Проблема модифицирования алюминиево-кремниевой эвтектики силуминов. Пути решения / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 2 (91). – С. 12–15.
124. Марукович, Е.И. К решению научной проблемы модифицирования микроструктуры литейных сплавов / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство*. – 2018. – № 8. – С. 2–4.
125. Марукович, Е.И. О модифицировании эвтектики отливок из силумина / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство*. – 2018. – № 9. – С. 6–8.
126. Марукович, Е.И. Научная проблема металлических расплавов. Пути решения / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2018. – № 5. – С. 7–9.
127. Марукович, Е.И. Кристаллизация металлов и сплавов. Проблема. Пути решения / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 3 (92). – С. 22–25.

128. Марукович, Е.И. Пути решения научной проблемы модифицирования литейных сплавов / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 4 (93). – С. 15–18.

129. Марукович, Е.И. Пути решения проблемы структурной наследственности сплавов / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 1 (94). – С. 21–23.

130. Марукович, Е.И. Научная проблема модифицирования первичных кристаллов  $\alpha$ -фазы отливок из силумина и пути ее решения / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2019. – № 3. – С. 10–12.

131. Марукович, Е.И. О модифицировании первичных кристаллов  $\beta$ -фазы отливок из силумина / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2019. – № 5. – С. 7–8.

132. Марукович, Е.И. Технологические проблемы модифицирования структуры отливок из силуминов. Пути решения / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство*. – 2019. – № 10. – С. 18–20.

133. Марукович, Е.И. Термодинамические основы плавления металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 1. – С. 14–17.

134. Марукович, Е.И. Структура металлического расплава / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Металлургия машиностроения*. – 2020. – № 3. – С. 15–16.

135. Марукович, Е.И. Термодинамические основы кристаллизации металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 2. – С. 8–11.

### **Материалы международных конференций**

136. Марукович, Е.И. Способ получения тиксотропных материалов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 мая 2002 г.* – Могилев : МГТУ, 2002. – С. 223.

137. Марукович, Е.И. Получение тиксотропных материалов методом непрерывного горизонтального литья / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литейное производство сегодня и завтра: материалы 3-й Всероссийской науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 25–27 июня 2002 г.* – Санкт-Петербург: С.-Пет. ГПУ, 2002. – С. 75–76.

138. Marukovich, E.I. Casting of silumins with nanostructure eutectic silicon / E.I. Marukovich, V.Y. Stetsenko // *Casting Technology 5000 Years and Beyond : Proceeding of the 66<sup>th</sup> World Foundry Congress, Istanbul , Turkey, 6–9 September 2004.* – Istanbul: Foundryment's Association of Turkey, 2004. – P. 1349–1354.

139. Марукович, Е.И. Улучшение структурной наследственности сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Внепечная обработка литейных сплавов и экология литейного производства: материалы Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 1–2 апреля 2004 г.* – Минск : БНТУ, 2004. – С. 42– 43.

140. Марукович, Е.И. Литье силуминов с высокодисперсным кремнием без применения модифицирующих флюсов и лигатур / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф, Минск, 27–29 марта 2006 г.* – Минск : Энергоперспектива, 2006. – С. 114–118.

141. Stsiatsenka, V.Y. Development of ultra fine Al Alloy composite technology using by intensive quenching and continuous casting equipment / V.Y. Stsiatsenka // Book of Reports of the Korea–Eurasia Technology Cooperation Workshop, Korea, November, 15<sup>th</sup>. – Inghchon: KITECH, 2006. – P. 81–91.

142. Стеценко, В.Ю. Получение отливок из силуминов с наноструктурным кремнием / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2006 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – С. 244.

143. Стеценко, В.Ю. Повышение эффективности непрерывного литья силуминов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.М. Певнев // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 265–267.

144. Марукович, Е.И. Развитие и применение литья закалочным затвердеванием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // труды Восьмого съезда литейщиков России. Т. 1, Ростов-на-Дону, Россия, 23–27 апреля 2007 г. – Ростов-на-Дону : РАЛ, 2007 г. – С. 88–95.

145. Стеценко, В.Ю. Технологические основы получения заготовок из Al – Si сплавов с наноструктурным кремнием / В.Ю. Стеценко // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: сб. докл. 8-го Междунар. конгресса, Харьков, Украина, 28 мая–1 июня 2007 г. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», ИПЦ «Контракт», 2007. – С. 136–138.

146. Стеценко, В.Ю. Влияние состава и термообработки на структуру и свойства антифрикционных силуминов / В.Ю. Стеценко, С.А. Харьков // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 162–164.

147. Марукович, Е.И. Повышение свойств алюминиевых сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь : труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 255–258.

148. Стеценко, В.Ю. Наследственное модифицирование заготовок поршней из сплава КС-740 / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько, Е.В. Урбанович // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 259–261.

149. Марукович, Е.И. Модифицированный силуминовый модификатор для непрерывной разливки стали на МНЛЗ / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. – С. 63–65.

150. Стеценко, В.Ю. Сэндвич-процесс при модифицировании стали / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, В.М. Гацура // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 77–78.

151. Стеценко, В.Ю. О классификациях и механизмах примесного модифицирования / В.Ю. Стеценко // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь : труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 74–76.

152. Стеценко, В.Ю. Разработка математической модели затвердевания эвтектического силумина в струйном кристаллизаторе / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько, Р.В. Коновалов // *Металлургия и литейное производство 2007*. Беларусь : труды Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сентября 2007 г. – Жлобин : ПО «БМЗ», 2007. – С. 302–304.

153. Марукович, Е.И. Литье алюминиевых сплавов с наноструктурным и сфероидальным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Литье алюминия : материалы Междунар. конф.*, Москва, 27–29 марта 2007 г. – Москва : ООО «Политег-Мет», 2007. – CD-ROM.

154. Стеценко, В.Ю. Методика расчета гидродинамического пограничного слоя при охлаждении кристаллизатора / В.Ю. Стеценко, В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Могилев, 19–20 апреля 2007 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – С. 97.

155. Стеценко, В.Ю. Экологически чистая технология получения высококачественных силуминов из вторичных Al – сплавов / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // *Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.*, Гродно, 27–28 сентября 2007 г. – Гродно : ГрГУ, 2007. – С. 477–482.

156. Стеценко, В.Ю. Антифрикционные силумины / В.Ю. Стеценко // *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. IX Междунар. науч.-техн. конгресса термистов и металловедов*, Харьков, Украина, 21–25 апреля 2008 г. Т. 2. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2008. – С. 183–187.

157. Стеценко, В.Ю. Наследственное модифицирование / В.Ю. Стеценко // *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. IX Междунар. науч.-техн. конгресса термистов и металловедов*, Харьков, Украина, 21–25 апреля 2008 г. Т. 2. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2008. – С. 188–192.

158. Стеценко, В.Ю. Универсальные структурно-высокодисперсные силуминовые модификаторы сплавов / В.Ю. Стеценко // *Технологии, оборудование, качество : материалы 11-го Междунар. симпозиума*, Минск, 13–16 мая 2008 г. – Минск : ВЧУП «Экспофорум», 2008. – CD-RUM.

159. Стеценко, В.Ю. Нанокристаллизация в металлах и сплавах / В.Ю. Стеценко // *Наноматериалы : сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи – 2008*, Харьков, Украина, 26–30 мая 2008 г. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2008. – С. 159–162.

160. Стеценко, В.Ю. О влиянии пузырьков газа на nano- и микрокристаллизацию фаз в металлах и сплавах / В.Ю. Стеценко // *Наноматериалы: сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи – 2008*, Харьков, Украина, 26–30 мая 2008 г. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2008. – С. 163–167.

161. Марукович, Е.И. Литье высокодисперсного алюминиевого композита / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, З.М. Ловшенко // *Нанокompозитные материалы : материалы двадцать восьмой Междунар. конф.*, Ялта – Киев, Украина, 26–30 мая 2008 г. – Ялта – Киев : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. – С. 379–382.

162. Лаптинский, В.Н. Численно-аналитический метод расчета охлаждающей способности кристаллизатора / В.Н. Лаптинский, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Между-*



нар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апреля 2008 г. Ч. 1. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 45.

163. Стеценко, В.Ю. Определение принципиальной возможности штамповки втулок из силуминов / В.Ю. Стеценко, В.Я. Щукин, А.И. Ривкин // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апреля 2008 г. Ч. 2.* – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 98.

164. Марукович, Е.И. Наследственность в заэвтектических силуминах / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Наследственность в литейных процессах : труды VII Междунар. науч.-техн. симпозиума, Самара, Россия, 13–16 октября 2008 г.* – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – С. 75–80.

165. Стеценко, В.Ю. Литье наноструктурных силуминов / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // *Наследственность в литейных процессах : труды VII Междунар. науч.-техн. симпозиума, Самара, Россия, 13–16 октября 2008 г.* – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – С. 290–295.

166. Marukovich, E.I. Application of structurally-superfine silumins for modifying of alloys / E.I. Marukovich, V.Y. Stetsenko, Ki-Yong Choi // *Korea – Belarus science days : book of Reports of the Forum, Seoul, Korea, 2–3.12.2008.* – Seoul : KICOS, 2008. – P. 95–104.

167. Стеценко, В.Ю. Измельчение микроструктуры отливок из силуминов структурно-высокодисперсным силуминовым модификатором / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // *труды Девятого съезда литейщиков России. Т. 1., Уфа, Россия, 20–24 апреля 2009 г.* – Уфа : РАЛ, 2009. – С. 112–114.

168. Лаптинский, В.Н. Расчет охлаждающей способности кристаллизатора при непрерывном литье / В.Н. Лаптинский, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апреля 2009 г. Ч. 1.* – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2009. – С. 75.

169. Марукович, Е.И. Получение и применение антифрикционного алюминиево-кремниевое композита / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // *Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 мая 2010 г.* – Минск : БНТУ, 2010. – С. 7–8.

170. Стеценко, В.Ю. Антифрикционный силумин для подшипников скольжения / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, Р.В. Коновалов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2010 г. Ч. 1.* – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 248.

171. Лаптинский, В.Н. К расчету охлаждающей способности струйного кристаллизатора при непрерывном литье / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апреля 2011 г. Ч. 1.* – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 49.

172. Стеценко, В.Ю. Прогнозный расчет оптимального размера кольцевой щели в устройстве вторичного охлаждения отливок / В.Ю. Стеценко, В.Н. Лаптинский, А.И. Ривкин // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апреля 2011 г. Ч. 1.* – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 83.

173. Стеценко, В.Ю. Литье мелкокристаллических заготовок поршней из заэвтектического силумина / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, А.А. Сидорский // материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апреля 2011 г. Ч. 1. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 204–205.

174. Лаптинский, В.Н. Оценка охлаждающей способности струйного кристаллизатора при непрерывном литье / В.Н. Лаптинский, А.А. Романенко, В.Ю. Стеценко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 41.

175. Лаптинский, В.Н. Методика расчета затвердевания отливки в струйном кристаллизаторе при непрерывном литье / В.Н. Лаптинский, В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 42.

176. Стеценко, В.Ю. Производство и применение раскислителя-модификатора для стали / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2012 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 164.

177. Стеценко, В.Ю. Производство втулок из антифрикционного силумина для навесного оборудования экскаваторов / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апреля 2013 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 103.

178. Стеценко, В.Ю. Производство биметаллических заготовок «Ст25Л-АК15М3» для червячных колес редукторов / В.Ю. Стеценко, В.В. Новиков // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апреля 2013 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 104.

179. Стеценко, В.Ю. Получение наноструктурных силуминовых отливок диаметром 75 мм / В.Ю. Стеценко, Р.В. Коновалов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 апреля 2013 г. Ч. 1. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 155.

180. Стеценко, В.Ю. Температурные исследования процесса литья намораживанием на водоохлаждаемом стержне / В.Ю. Стеценко, В.А. Деметьев, К.Н. Баранов // Литейное производство и металлургия 2014. Беларусь : труды 22-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–24 октября 2014 г. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 50–54.

181. Стеценко, В.Ю. Термовременная обработка отливок из силуминов АК18 при литье направленным затвердеванием от стержня / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апреля 2014 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 159–160.

182. Стеценко, В.Ю. Получение биметаллических заготовок «Ст45Л – антифрикционный силумин АК15М3» диаметром 55 мм / В.Ю. Стеценко, В.В. Новиков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апреля 2014 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 161.

183. Марукович, Е.И. Литье, свойства и применение антифрикционного силумина / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь : труды 23-й Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 21–22 октября 2015 г. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 9–12.

184. Марукович, Е.И. Непрерывное горизонтальное литье силуминов в струйный кристаллизатор / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь : труды 23-й Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 21–22 октября 2015 г. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 38 – 40.

185. Стеценко, В.Ю. Использование заготовок из антифрикционного силумина для вкладышей люнета токарных станков / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апреля 2015 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 125.

186. Стеценко, В.Ю. Производство и применение заготовок из антифрикционного силумина / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апреля 2015 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 126–127.

187. Стеценко, В.Ю. Сплав алитирования для литья биметаллических заготовок «Сталь – антифрикционный силумин» / В.Ю. Стеценко, В.В. Новиков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 апреля 2015 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 128.

188. Марукович, Е.И. Литье заэвтектического силумина в струйный кристаллизатор / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Прогрессивные литейные технологии : труды VIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 16–20 ноября 2015 г. – Москва : НИТУ «МИСиС», 2015. – С. 40–43.

189. Стеценко, В.Ю. Антифрикционный силумин для втулок сателлитов дифференциалов карьерных самосвалов / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апреля 2016 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 106.

190. Стеценко, В.Ю. Получение слитков диаметром 75 мм из заэвтектического силумина АК18 с мелкокристаллической структурой / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апреля 2016 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 107.

191. Марукович, Е.И. Литье силумина. Новые подходы / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство сегодня и завтра : труды Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–17 июня 2016 г. – СПб : Изд-во Культинформ-пресс, 2016. – С. 173–182.

192. Марукович, Е.И. Литье силумина ускоренным затвердеванием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь : труды Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 октября 2016 г. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 5–9.

193. Стеценко, В.Ю. Применение антифрикционного силумина для кузнечно-прессового оборудования / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Литейное

производство и металлургия 2016. Беларусь : труды Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 октября 2016 г. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 10–12.

194. Марукович, Е.И. Силумин с глобулярным кремнием. Получение, свойства, применение / Е. И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // Перспективные материалы и технологии : материалы Междунар. симпозиума, Витебск, 22–26 мая 2017 г. – Ч. 1. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – С. 42–44.

195. Стеценко, В.Ю. Силумин с глобулярным кремнием / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 92–93.

196. Стеценко, В.Ю. Применение силумина с глобулярным кремнием в трубопрокатном производстве / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, А.П. Гутев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 94.

197. Марукович, Е.И. Термодинамика наноструктурных процессов кристаллизации эвтектического силумина / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь : сб. трудов 25-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 октября 2017 г. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 104–106.

198. Марукович, Е.И. Основные элементы и механизм металлургической наследственности при литье сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство и металлургия 2017. Беларусь : сб. трудов 25-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 октября 2017 г. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 148–149.

199. Марукович, Е.И. Силумин с глобулярным кремнием – заменитель антифрикционных бронз / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 октября 2018 г. – Минск : Белорусская наука, 2018. – С. 66–69.

200. Марукович, Е.И. Применение наследственного модифицирования для решения проблем литья силумина / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // XVIII Международная конференция по науке и технологиям Россия – Корея – СНГ : труды конференции, Москва, 26–28 августа 2018 г. – Новосибирск : НГТУ, 2018. – С. 276–280.

201. Марукович, Е.И. Проблема модифицирования микроструктуры алюминий-кремниевых сплавов. Пути решения / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь : труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 октября 2018 г. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 14–19.

202. Стеценко, В.Ю. Получение полых заготовок наружным диаметром более 200 мм из эвтектического силумина с глобулярным кремнием / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь : труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 октября 2018 г. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 69–71.

203. Стеценко, В.Ю. Использование литых заготовок из силумина с глобулярным кремнием в промышленности / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь : труды 26-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 октября 2018 г. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 92–95.

204. Марукович, Е.И. Проблемы структурной наследственности при литье сплавов. Пути решения / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Наследственность в литейных процессах : материалы 8-й Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием, Самара, 8–18 октября 2018 г. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 173–177.

205. Стеценко, В.Ю. Использование вибрации струйного кристаллизатора для повышения качества отливок из силуминов / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, А.П. Гутев // Литейное производство и металлургия 2019. Беларусь : труды 27-й Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 16–17 октября 2019 г. – Жлобин : БМЗ, 2019. – С. 154–156.

206. Стеценко, В.Ю. Внедрение антифрикционного силумина в белорусское машиностроение / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, А.П. Гутев // Машиностроение и термическая обработка : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 10–11 октября 2019 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 59–61.

207. Стеценко, В.Ю. Наследственное модифицирование – способ повышения свойств отливок из силумина / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 апреля 2019 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 150.

208. Стеценко, В.Ю. Применение антифрикционного силумина для повышения ресурса работы червячных колес / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Машиностроение и термическая обработка : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 10–11 октября 2019 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 61–63.

209. Стеценко, В.Ю. Получение слитков диаметром 85 мм из силумина с инвертированной микроструктурой / В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, К.Н. Баранов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апреля 2020 г. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 144–145.

### Тезисы докладов

210. Марукович, Е.И. Особенности кристаллизации доэвтектических силуминов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Прогрессивные литейные технологии : тезисы докладов Второй междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19–21 ноября 2002 г. – Москва : МИСиС (Технологический университет), 2002. – С. 83–84.

211. Марукович, Е.И. Износостойкость и антифрикционность силуминов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // О природе трения твердых тел : тезисы докладов Междунар. симпозиума, Гомель, 28–30 августа 2002 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2002. – С. 47–48.

212. Марукович, Е.И. Силумин с инвертированным наноструктурным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Проблемы космической триботехники: тезисы докладов Междунар. науч.-практ. семинара, Гомель, 26–28 августа 2004 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2004. – С. 17–18.

213. Марукович, Е.И. Получение алюминиево-кремниевых сплавов с наноструктурным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Полимерные компо-

зиты и трибология : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 18–21 июля 2005 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2005. – С. 103–104.

214. Лаптинский, В.Н. Методика аналитического расчета гидродинамики охлаждения кристаллизатора / В.Н. Лаптинский, В.Ю. Стеценко // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VI Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 19–20 октября 2006 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. – С. 39.

215. Стеценко, В.Ю. Повышение охлаждающей способности кристаллизатора / В.Ю. Стеценко, С.Л. Радько // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VI Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 19–20 октября 2006 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. – С. 42.

216. Марукович, Е.И. Триботехнические свойства силуминов с наноструктурным эвтектическим кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Полимерные композиты и трибология : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 16–19 июля 2007 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2007. – С. 56.

217. Марукович, Е.И. Повышение технологических свойств заготовок из силуминов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Energia w nauce i technice : streszczenia referatow VI Konferencja naukowo-praktyczna, Suwalki, Polska, 2007 g. – Suwalki : Politechnika Bialostocka, 2007. – С. 30.

218. Стеценко, В.Ю. Экологически чистая технология получения высококачественных силуминов из вторичных Al – сплавов / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тезисы докладов 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 27–28 сентября 2007 г. – Гродно : ГрГУ, 2007. – С. 121.

219. Стеценко, В.Ю. Универсальные структурно-высокодисперсные силуминовые модификаторы сплавов / В.Ю. Стеценко // Технологии, оборудование, качество : тезисы докладов 11-го Междунар. симпозиума, Минск, 13–16 мая 2008 г. – Минск : ВЧУП «Экспофорум», 2008. – С. 101.

220. Стеценко, В.Ю. Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор для чугунов и медных сплавов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, А.М. Певнев // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–24 октября 2008 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – С. 32–33.

221. Стеценко, В.Ю. Модифицирование силуминов мелкокристаллическими силуминовыми сплавами / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев, Р.В. Коновалов // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–24 октября 2008 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – С. 33–34.

222. Марукович, Е.И. Получение объемных наноструктурных алюминиево-кремниевых сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Перспективные материалы и технологии : тезисы докладов Междунар. симпозиума, Витебск, 25–29 мая 2009 г. – Витебск : ВГТУ, 2009. – С. 45.

223. Марукович, Е.И. Литье и применение наноструктурных алюминиево-кремниевых сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Полимерные композиты и трибология : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июня 2009 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2009. – С. 153.

224. Стеценко, В.Ю. К задаче о тепловом пограничном слое / В.Ю. Стеценко, А.А. Романенко, В.Н. Лаптинский, Р.В. Коновалов // Математическое моделирование и дифференциальные уравнения : тезисы докладов Второй междунар. науч. конф. Часть I. Минск, 24–28 августа 2009 г. – Минск : Институт математики НАН Беларуси, 2009. – С. 80.

225. Стеценко, В.Ю. К задаче о динамическом ламинарном пограничном слое / В.Ю. Стеценко, А.А. Романенко, В.Н. Лаптинский, Р.В. Коновалов // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений : тезисы докладов междунар. конф., Минск, 14–19 сентября 2009 г. – Минск : Институт математики НАНБ, 2009. – С. 153.

226. Стеценко, В.Ю. Непрерывное горизонтальное литье без модификаторов мелкокристаллических слитков из алюминиево-кремниевых сплавов / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–29 октября 2010 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. – С. 55–56.

227. Стеценко, В.Ю. Повышение фрикционной износостойкости алюминиево-кремниевых сплавов / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–29 октября 2010 г. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2010. – С. 54–55.

228. Marukovich, E.I. The water permeability antifriction silumin and application / E.I. Marucovich, V.Y. Stetsenko // Materials Engineering 2011 : Book of Abstract of 20<sup>th</sup> International Baltic Conference, Kaunas, Lithuania, 27–28 October 2011. – Kaunas : Technologija, 2011. – P. 18–19.

229. Марукович, Е.И. Непрерывное литье эвтектического силумина с наноструктурным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев, Р.В. Коновалов // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб – 2013) : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24–27 июня 2013 г. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2013. – С. 61.

230. Стеценко, В.Ю. Применение антифрикционного силумина в промышленности Республики Беларусь / В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов, А.П. Гутев // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тезисов докладов Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 3–4 октября 2019 г. – Гомель : НТКЦ ОАО «Гомсельмаш», 2019. – С. 130–131.

## Патенты

231. Кристаллизатор для непрерывного литья слитков : пат. 1959 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20040493; заявл. 01.11.2004 ; опубл. 30.06.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 2. – С. 276.

232. Устройство для охлаждения изделий : пат. 2250 Респ. Беларусь, МПК С 21 D 1/64 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20050193 ; заявл. 06.04.2005; опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 4. – С. 46.

233. Устройство для изготовления слитков : пат. 2251 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20050194 ; заявл. 06.04.2005 ; опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 4. – С. 30.

234. Способ литья заготовок : пат. 288067 Российская Федерация, МПК В 22 D 7/00, В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2005103161/02 ; заявл. 08.02.2005 ; опубл. 27.11.2006 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2006. – № 33.

235. Устройство для охлаждения отливок : пат. 3404 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060587 ; заявл. 14.09.2006 ; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 160.

236. Устройство для охлаждения отливок : пат. 3408 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060594 ; заявл. 18.09.2006 ; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 160.

237. Устройство для изготовления слитков : пат. 3510 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060679 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.04.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 199.

238. Устройство для получения слитков : пат. 3511 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060680 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.04.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 200.

239. Кристаллизатор для непрерывного литья : пат. 3526 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060696 ; заявл. 30.10.2006 ; опубл. 30.04.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 197.

240. Устройство для получения отливок : пат. 3547 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060681 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.04.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 200.

241. Устройство для охлаждения отливок : пат. 3570 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060766 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 182.

242. Устройство для затвердевания заготовок : пат. 3571 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060767 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл.



30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 182.

243. Устройство для затвердевания отливок : пат. 3572 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060769 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 183.

244. Устройство для производства отливок : пат. 3573 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060770 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 184.

245. Устройство для литья заготовок : пат. 3574 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060771 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 184.

246. Устройство для получения заготовок : пат. 3575 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.Л. Радько ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060772 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 184.

247. Устройство для вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка : пат. 3658 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060815 ; заявл. 01.12.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 180.

248. Кристаллизатор для непрерывного литья слитков : пат. 3659 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, В.А. Земцов, Ю.В. Саченко, С.Р. Чудаков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060816 ; заявл. 01.12.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 181.

249. Кристаллизатор с высокой производительностью литья : пат. 3665 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060677 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 178.

250. Кристаллизатор с повышенной интенсивностью охлаждения : пат. 3663 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060675 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 177.

251. Кристаллизатор с повышенной скоростью литья : пат. 3664 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060676 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 178.

252. Кристаллизатор для непрерывных литья и разлива металлов и сплавов : пат. 3666 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ;

заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060678 ; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 178.

253. Кристаллизатор для непрерывной разливки металлов и сплавов: пат. 3667 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060697 ; заявл. 30.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 179.

254. Кристаллизатор для непрерывного литья слитков металлов и сплавов : пат. 3668 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060698 ; заявл. 30.10.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 179.

255. Кристаллизатор для литья заготовок направленным затвердеванием : пат. 3669 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060719 ; заявл. 03.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 181.

256. Кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья : пат. 3670 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060724 ; заявл. 04.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 180.

257. Кристаллизатор для непрерывного литья металлов и сплавов : пат. 3671 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060726 ; заявл. 04.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 180.

258. Устройство для охлаждения заготовок : пат. 3673 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, С.А. Харьков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20060768 ; заявл. 17.11.2006 ; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 183.

259. Способ охлаждения кристаллизатора : пат. 2342220 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/055 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2007107234/02 ; заявл. 26.02.2007 ; опубл. 27.12.2008 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2008. – № 36.

260. Устройство для охлаждения заготовок из черных и цветных металлов : пат. 4628 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080125 ; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 171.

261. Способ литья заготовки : пат. 10609 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Бела-

руси. – № а 20041073 ; заявл. 23.11.2004 ; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 78.

262. Способ охлаждения кристаллизатора для непрерывного литья заготовок или слитков : пат. 11188 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20060643 ; заявл. 29.06.2006 ; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 66–67.

263. Устройство для получения полых отливок : пат. 4550 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080024 ; заявл. 15.01.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 169.

264. Устройство для литья полых заготовок : пат. 4551 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080028 ; заявл. 15.01.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 170.

265. Дорн для литья полых слитков из алюминиевых сплавов : пат. 4553 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080025 ; заявл. 15.01.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 166.

266. Дорн для литья полых слитков из металлов и сплавов : пат. 4554 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080026 ; заявл. 15.01.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 167.

267. Устройство вторичного охлаждения слитка при непрерывном литье : пат. 4627 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080122 ; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 169.

268. Устройство для производства заготовок из черных и цветных металлов : пат. 4629 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080126 ; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 171.

269. Устройство для изготовления отливок : пат. 4633 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080113 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 170.

270. Кристаллизатор для непрерывного литья заготовок : пат. 4634 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080116 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 168.

271. Устройство вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка : пат. 4636 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель

Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080119 ; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 168.

272. Устройство вторичного охлаждения слитков : пат. 4637 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080120 ; заявл. 19.02.2008; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 168.

273. Устройство для вторичного охлаждения слитка : пат. 4638 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080121 ; заявл. 19.02.2008; опубл. 30.08.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 169.

274. Стержень для литья полых заготовок : пат. 4717 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 15/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080027 ; заявл. 15.01.2008 ; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4. – С. 178.

275. Кристаллизатор для непрерывной разливки сплавов : пат. 4727 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, А.М. Певнев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080124; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 177.

276. Кристаллизатор для непрерывного литья слитков квадратного и прямоугольного сечений : пат. 4734 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080114 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 175–176.

277. Устройство для изготовления заготовок из черных и цветных металлов : пат. 4735 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20080115 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 179.

278. Дорн для литья полых слитков из алюминиевых сплавов : пат. 2376102 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2008134264/02 ; заявл. 20.08.2008 ; опубл. 20.12.2009 // Бюллетень / Фед. служба по интелект. собств., пат. и тов. зн. – 2009. – № 35.

279. Дорн для литья полых слитков из металлов и сплавов : пат. 2376103 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2008134266/02 ; заявл. 20.08.2008 ; опубл. 20.12.2009 // Бюллетень / Фед. служба по интелект. собств., пат. и тов. зн. – 2009. – № 35.

280. Кристаллизатор для непрерывного литья : пат. 11983 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № a 20061019; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.06.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 67.

281. Кристаллизатор для непрерывного литья : пат. 12444 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии метал-

лов НАН Беларуси. – № а 20061020; заявл. 23.10.2006 ; опубл. 30.10.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 64.

282. Устройство для вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка : пат. 12279 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20061211; заявл. 01.12.2006 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 84.

283. Кристаллизатор для непрерывного литья слитков металлов и сплавов : пат. 12100 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20061062; заявл. 30.10.2006 ; опубл. 30.06.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 67–68.

284. Мелкокристаллический модификатор для силуминов : пат. 12287 Респ. Беларусь, МПК С 22 С 1/03 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20080175; заявл. 19.02.2008 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 118.

285. Устройство для получения полых отливок из металлов и сплавов : пат. 5419 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090032 ; заявл. 14.01.2009 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 192.

286. Кристаллизатор для непрерывного литья сплавов : пат. 5425 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090048 ; заявл. 20.10.2009 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 190.

287. Кристаллизатор для горизонтального литья структурно-высокодисперсных чушковых слитков : пат. 5465 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090020 ; заявл. 13.01.2009 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 189–190.

288. Кристаллизатор для горизонтального литья структурно-высокодисперсных модификаторов : пат. 5507 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090028 ; заявл. 13.01.2009 ; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 190.

289. Установка для закалки изделий : пат. 5676 Респ. Беларусь, МПК С 21 D 1/62 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090296 ; заявл. 09.04.2009 ; опубл. 30.10.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 175.

290. Кристаллизатор для непрерывного литья : пат. 5657 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090288 ; заявл. 07.04.2009 ; опубл. 30.10.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 163.

291. Устройство для закалки заготовок : пат. 5797 Респ. Беларусь, МПК С 21 D 1/62 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090179 ; заявл. 10.03.2009 ; опубл. 30.12.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 6. – С. 186.

292. Мелкокристаллический модификатор для силуминов : пат. 2397262 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/04, С 22 С 1/03 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2008134244/02 ; заявл. 20.08.2008 ; опубл. 27.02.2010 // Бюллетень / Фед. служба по интеллектуал. собств., пат. и тов. зн. – 2010. – № 23.

293. Дорн для литья полого слитка из алюминиевых сплавов : пат. 13012 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20080051 ; заявл. 16.01.2008 ; опубл. 30.04.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 68.

294. Многоразовый стержень для получения полой заготовки : пат. 13013 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 15/00 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20080052 ; заявл. 16.01.2008 ; опубл. 30.04.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 69.

295. Дорн для литья полого слитка из металлов или сплавов : пат. 13011 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20080050 ; заявл. 16.01.2008 ; опубл. 30.04.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 68.

296. Кристаллизатор для непрерывного литья плоских слитков : пат. 6201 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20090842 ; заявл. 16.10.2009 ; опубл. 30.04.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 2. – С. 176.

297. Устройство для получения полых отливок : пат. 6729 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100346 ; заявл. 08.04.2010 ; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 182.

298. Кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья : пат. 6739 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100367 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 181.

299. Устройство для получения отливок : пат. 6740 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100368 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 182–183.

300. Устройство для изготовления отливок : пат. 6741 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100369 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл.

30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 183.

301. Изложница для центробежного литья алюминиевых сплавов : пат. 7007 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 13/00 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.М. Певнев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100624 ; заявл. 12.07.2010 ; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 196.

302. Устройство для получения фасонных отливок с мелкокристаллической структурой : пат. 6828 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100381 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 30.12.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 163.

303. Кристаллизатор для литья слитков : пат. 6830 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № u 20100387 ; заявл. 20.04.2010 ; опубл. 30.12.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 163.

304. Кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья слитков : пат. 2436651 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/055, В 22 D 11/045 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко,; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2009131549/02 ; заявл. 19.08.2009 ; опубл. 20.11.2011 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2011. – № 35.

305. Кристаллизатор для горизонтального литья слитка модификатора : пат. 2428275 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/055, В 22 D 11/045 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко,; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2009131546/02 ; заявл. 19.08.2009 ; опубл. 10.09.2011 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2011. – № 25.

306. Кристаллизатор для горизонтального литья слитка структурно-высокодисперсного модификатора : пат. 14149 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20090037 ; заявл. 13.01.2009 ; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 72.

307. Устройство для получения полой отливки из металла или сплава : пат. 14150 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 7/00, В 22 D 27/04 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20090043 ; заявл. 14.01.2009 ; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 71.

308. Кристаллизатор для горизонтального литья структурно-высокодисперсного чушкового слитка : пат. 14276 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20090031 ; заявл. 13.01.2009 ; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 72.

309. Способ закалки изделия : пат. 14476 Респ. Беларусь, МПК С 22 D 1/62 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20090445 ; заявл. 26.03.2009 ; опубл. 30.06.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 110.

310. Кристаллизатор для непрерывного литья металла или сплава : пат. 14497 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20090495 ; заявл. 07.04.2009 ; опубл. 30.06.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 78.

311. Кристаллизатор для непрерывного литья плоских слитков : пат. 7077 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/00 / В.Ю. Стеценко, С.Р. Чудаков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20100673 ; заявл. 29.07.2010 ; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 175.

312. Устройство для получения полых и биметаллических отливок : пат. 7200 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 7/00, В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, К.Н. Баранов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20100647 ; заявл. 16.07.2010 ; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 171.

313. Кристаллизатор для литья слитков : пат. 2458757 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2010146433/02; заявл. 15.11.2010 ; опубл. 20.08.2012 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2012. – № 23.

314. Мелкокристаллическая алюминиево-кремниевая лигатура : пат. 15540 Респ. Беларусь, МПК С 22 С 21/02 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20101058; заявл. 12.07.2010 ; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 119.

315. Кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья : пат. 16350 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20100554 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 61.

316. Устройство для получения отливок : пат. 16421 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20100555 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 61–62.

317. Устройство вторичного охлаждения слитка : пат. 8440 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, В.В. Новиков ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20120028 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 30.08.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 189.

318. Устройство вторичного охлаждения непрерывнолитого слитка : пат. 8439 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20120027 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 30.08.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 189.

319. Устройство для производства полых отливок : пат. 8438 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, А.П. Гутев ; заявитель Ин-т тех-



нологии металлов НАН Беларуси. – № и 20120026 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 30.08.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 188.

320. Устройство для производства полых заготовок : пат. 8437 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, К.Н. Баранов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20120025 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 30.08.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 188.

321. Антифрикционный сплав на основе алюминия : пат. 17697 Респ. Беларусь, МПК С 22 С 21/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович, А.И. Ривкин ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20111530 ; заявл. 17.11.2011 ; опубл. 30.12.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 110.

322. Устройство для получения полый или биметаллической отливки : пат. 17313 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 27/04 / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, К.Н. Баранов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20101095 ; заявл. 16.07.2010 ; опубл. 30.06.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 78.

323. Устройство для горизонтального непрерывного литья направленным застыванием полых заготовок из металлов и сплавов : пат. 9704 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20130352 ; заявл. 22.04.2013 ; опубл. 30.12.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 184–185.

324. Устройство для горизонтального непрерывного литья полых заготовок из металлов и сплавов : пат. 9705 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 11/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № и 20130354 ; заявл. 22.04.2013 ; опубл. 30.12.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 185.

325. Кристаллизатор для непрерывного горизонтального литья : пат. 2477668 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/045 / В.Ю. Стеценко, А.М. Певнев, Р.В. Коновалов ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2010146432/02 ; заявл. 15.11.2010 ; опубл. 20.03.2013 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2013. – № 8.

326. Способ получения полый отливки : пат. 18286 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 7/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20111531 ; заявл. 17.11.2011 ; опубл. 30.06.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 70.

327. Способ литья заготовок : пат. 18292 Респ. Беларусь, МПК В 22 D 7/08, В 22 D 27/04, В 22 D 15/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № а 20111532 ; заявл. 17.11.2011 ; опубл. 30.06.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 71.

328. Способ получения полых отливок : пат. 2516178 Российская Федерация, МПК В 22 D 7/04 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2012119331/02 ; заявл. 11.05.2012 ; опубл. 20.05.2014 // Бюллетень / Фед. служба по интеллект. собств., пат. и тов. зн. – 2014. – № 14.

329. Антифрикционный сплав на основе алюминия : пат. 2504595 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/04, С 22 С 21/12 / В.Ю. Стеценко, Е.И. Марукович ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2012119330/02 ; заявл. 11.05.2012 ; опубл. 20.01.2014 // Бюллетень / Фед. служба по интелект. собств., пат. и тов. зн. – 2014. – № 2.

330. Способ литья заготовок : пат. 2503521 Российская Федерация, МПК В 22 D 15/00 / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко ; заявитель Ин-т технологии металлов НАН Беларуси. – № 2012119338/02 ; заявл. 11.05.2012 ; опубл. 10.01.2014 // Бюллетень / Фед. служба по интелект. собств., пат. и тов. зн. – 2014. – № 1.

## РЭЗЬЮМЭ

Сцяцэнка Уладзімір Юзэфавіч

**Тэарэтычныя і тэхналагічныя асновы атрымання нарыхтовак павышанай зносаўстойлівасці з сілумінаў з высокадзісперсных інвертаванай структурай**

**Ключавыя словы:** ліццё сілумінаў, інвертаваная мікраструктура, крышталізацыя, мадыфікаванне, затоплена-струменевае астуджэнне, закалачнае зацвярдзенне, структурная спадчыннасць, антыфрыкцыйны сілумін.

**Мэта даследавання:** развіццё механізмаў нуклеацыі і мадыфікавання, распрацоўка спосабаў ліцця сілумінаў з высокадзісперсных інвертаванай мікраструктуру без прымянення мадыфікатараў для атрымання нарыхтовак з высокімі механічнымі і антыфрыкцыйнымі ўласцівасцямі.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** металаграфічныя, фізічныя, цеплавыя, трыбатэхнічныя, тэрмадынамічныя метады; аптычныя, электронныя мікраскопы, разрыўныя машыны, цвярдамеры, тэрмапары, машыны трэння, кампутары.

**Атрыманія вынікі і іх навізна:** асноўнымі элементамі пры крышталізацыі сплаваў з'яўляюцца нанакрышталі фаз; бурбалкі вадароду аказваюць непасрэдны ўплыў на марфалогію эўтэктчных крышталяў; асноўнымі працэсамі пры мадыфікаванні сілумінаў з'яўляюцца інтэнсіўнасць каагуляцыі нанакрышталяў фаз, рафінаванне ад адсарбаваных атамаў кіслароду і вадароду, прадухіленне вылучэння бурбалак вадароду на эўтэктчных крышталяў фаз. Распрацаваны спосабы ліцця і тэхналагічнае абсталяванне для атрымання сілумінаў з высокадзісперснай інвертаванай мікраструктурай, заснаваныя на паскораным зацвярдзенні адлівак. Распрацаваны спосаб структурна-спадчыннага мадыфікавання, заснаваны на выкарыстанні адлівак з высокадзісперснай інвертаванай мікраструктурай. Распрацаваны антыфрыкцыйны сілумін, які замяняе прамысловыя алюмініевыя і алавяныя бронзы. Распрацаваны ўніверсальныя сілумінавыя мадыфікатары для мадыфікавання сталі, чыгуну, бронзы і латуні.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі дысертацыі рэкамендуюцца да выкарыстання для развіцця тэорыі ліцейных працэсаў; распрацоўкі і стварэння прамысловых тэхналогій ліцця сілумінаў з высокімі механічнымі і трыбатэхнічнымі ўласцівасцямі.

**Вобласць ужывання:** тэорыя ліцейных працэсаў; ліцейная і металургічнае вытворчасці; рамонт і выраб вузлоў трэння машын і тэхналагічнага абсталявання.

## РЕЗЮМЕ

Стеценко Владимир Юозефович

**Теоретические и технологические основы получения заготовок повышенной износостойкости из силуминов с высокодисперсной инвертированной структурой**

**Ключевые слова:** литье силуминов, инвертированная микроструктура, кристаллизация, модифицирование, затопленно-струйное охлаждение, закалочное затвердевание, структурная наследственность, антифрикционный силумин.

**Цель исследования:** развитие механизмов нуклеации и модифицирования, разработка способов литья силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой без применения модификаторов для получения заготовок с высокими механическими и антифрикционными свойствами.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** металлографические, физические, тепловые, триботехнические, термодинамические методы; оптические, электронные микроскопы, разрывные машины, твердомеры, термомпары, машины трения, компьютеры.

**Полученные результаты и их новизна:** основными элементами при кристаллизации сплавов являются нанокристаллы фаз; пузырьки водорода оказывают непосредственное влияние на морфологию эвтектических кристаллов; основными процессами при модифицировании силуминов являются интенсивность коагуляции нанокристаллов фаз, рафинирование от адсорбированных атомов кислорода и водорода, предотвращение выделения пузырьков водорода на эвтектических кристаллах фаз. Разработаны способы литья и технологическое оборудование для получения силуминов с высокодисперсной инвертированной микроструктурой, основанные на ускоренном затвердевании отливок. Разработан способ структурно-наследственного модифицирования, основанный на использовании отливок с высокодисперсной инвертированной микроструктурой. Разработан антифрикционный силумин, который заменяет промышленные алюминиевые и оловянные бронзы. Разработаны универсальные силуминовые модификаторы для модифицирования стали, чугуна, бронзы и латуни.

**Рекомендации по использованию:** результаты диссертации рекомендуются к использованию для развития теории литейных процессов; разработки и создания промышленных технологий литья силуминов с высокими механическими и триботехническими свойствами.

**Область применения:** теория литейных процессов; литейное и металлургическое производства; ремонт и изготовление узлов трения машин и технологического оборудования.

## SUMMARY

Stetsenko Vladimir Yuzefovich

**Theoretical and technological foundations of billets production increased wear resistance from silumins with finely dispersed inverted structure**

**Keywords:** casting of silumins, inverted microstructure, crystallization, modification, submerged-jet cooling, hardening hardening, structural heredity, antifriction silumin.

**The purpose of the research:** development of nucleation and modification mechanisms, development of methods for casting silumins with highly dispersed inverted microstructure without using modifiers to obtain blanks with high mechanical and antifriction properties.

**Research methods and equipment used:** metallographic, physical, thermal, tribotechnical, thermodynamic methods; optical, electron microscopes, bursting machines, hardness testers, thermocouples, friction machines, computers.

**The obtained results and their novelty:** the main elements during the crystallization of alloys are nanocrystals of the phases; hydrogen bubbles have a direct impact on the morphology of eutectic crystals; The main processes in the modification of silumins are the intensity of coagulation of nanocrystals of phases, the refining from adsorbed oxygen and hydrogen atoms, and the prevention of the release of hydrogen bubbles on eutectic crystals of phases. Developed casting methods and process equipment for the production of silumin with a highly dispersed inverted microstructure, based on the accelerated solidification of castings. A method of structural and hereditary modification, based on the use of castings with a highly dispersed inverted microstructure, was developed. Antifriction silumin, which replaces industrial aluminum and tin bronzes, has been developed. Universal silumin modifiers for modifying steel, cast iron, bronze and brass have been developed.

**Recommendations for use:** the results of the thesis are recommended for use for the development of the theory of casting processes; development and creation of industrial technologies for casting silumin with high mechanical and tribological properties.

**Scope:** the theory of casting processes; foundry and metallurgical production; repair and manufacturing of friction units of machines and process equipment.