На правах рукописи

СОКОЛОВ Руслан Евгеньевич

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СИЛУМИНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2010

Работа выполнена на кафедре ОМД института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск)

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Сидельников Сергей Борисович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Гун Игорь Геннадьевич.
	кандидат технических наук, академический советник СО РИА Мотков Михаил Георгиевич
Ведущая организация:	ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита состоится «08» октября 2010 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.10 в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95, ауд. 212 л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Автореферат разослан «08» сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Гильманшина Т. Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы.

Алюминий и его сплавы, благодаря своим уникальным технико-эксплуатационным характеристикам, занимают большое место в современной промышленности. Наличие таких свойств, как высокая электропроводность и коррозионная стойкость в сочетании с небольшим весом, привели к тому, что алюминий и его сплавы нашли широкое применение в машиностроении, электроэнергетике, транспорте, авиации и других отраслях промышленности. Особое место в структуре производства полуфабрикатов из алюминия и его сплавов занимает проволока, которая применяется для изготовления линий электропередач, электротранспортных тросов, кабелей, электродов, присадочных прутков, сварочной проволоки и др. В последнее время возникла большая потребность в сварочной проволоке из силуминов, обусловленная высокими механическими и коррозионными свойствами этих сплавов. Данная продукция широко применяется в военной, космической и авиационной промышленности для сварки конструкций летательных аппаратов и находит широкое применение при заварке дефектов в литейном производстве. Высокая стоимость полуфабрикатов из силуминов, обусловленная большой трудоемкостью производства, сдерживает их широкое применение в других отраслях промышленности и делает актуальной проблему разработки новых технологий получения деформированных изделий из них.

Представленная работа выполнялась в рамках научной программы Минобразования России «Инновационная деятельность высшей школы» (2003 г.) по проекту №03.01.30 «Разработка и создание опытно-промышленного образца модульного агрегата прокатки-прессования интегрированной литейно-прессовой линии для производства длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов», гранта Президента РФ №НШ-2212.2003.8 (2003-2005 гг.) на поддержку молодых российских ученых и ведущих научных школ, научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2005 г.), подпрограммы № 2 «Прикладные исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники», проекта №52633, проекта «Разработка технологий и устройств для производства совмещенными методами изделий из новых материалов на основе сплавов цветных металлов и исследование их свойств» по программе развития СФУ на 2007–2010 год «Поддержка на конкурсной основе разработок по научно-методическому обеспечению образовательного процесса по приоритетным областям развития СФУ», молодежных грантов СФУ 2007-2009 годов, а также грантов 2009 – 2010 годов Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

---

* Диссертация выполнена при научной консультации доцента, д. т. н. С.В. Беляева.

Цель и задачи исследований.

Разработка комплекса технических и технологических решений для создания новой технологии производства сварочной проволоки из силуминов на основе применения методов совмещенной обработки.

Для достижения этой цели предусматривалось решение следующих задач:

– моделирование и исследование формоизменения металла и температурно-скоростных условий при асимметричном процессе совмещенной прокатки-прессования (СПП);

– изучение геометрического очага деформации и экспериментальные исследования технологических и энергосиловых параметров процесса получения прутков из сплавов АК5 и АК12 на установке СПП – 200;

– проведение исследований структуры и свойств полуфабрикатов из алюминиево-кремниевых сплавов, полученных совмещенными методами обработки;

– разработка новых технических решений и технологии производства сварочной проволоки из сплава АК12;

– создание программного обеспечения для сопровождения технологии совмещенной обработки металла и проектирования валкового и прессового инструмента.

Научная новизна полученных результатов.

1. С помощью компьютерного моделирования и теоретического анализа определены условия принципиальной реализуемости асимметричного процесса СПП и получены зависимости нейтральных углов на валках разного диаметра от геометрических параметров очага деформации (соотношения радиусов, дуг захвата валков и др.) и степени высотной деформации при прокатке.

2. Решена задача по определению температуры металла вдоль очага деформации с учетом разности диаметров валков, условий охлаждения рабочего инструмента и установлены закономерности ее изменения в зависимости от параметров очага деформации при СПП.

3. Получены экспериментальные данные по механическим свойствам литых и деформированных полуфабрикатов, изготовленных с применением электромагнитного кристаллизатора и установки совмещенной прокатки-прессования из алюминиево-кремниевых сплавов АК5 и АК12 .

4. Установлены закономерности изменения энергосиловых характеристик и температурно-скоростных условий процесса асимметричной прокатки-прессования для обработки силуминов.

Практическая ценность работы.

1. Создана методика компьютерного моделирования процесса асимметричной прокатки-прессования с применением программного комплекса DEFORM 3D.

2. Разработан комплекс технических решений, защищенных патентами № 67492, 68387, 70828, 73245, 2334574, 2335385.

3. Получены регрессионные зависимости для расчета энергосиловых параметров процесса СПП при обработке сплавов АК5 и АК12.

4. Разработаны технологические режимы, обеспечивающие при заданных температурно-скоростных и деформационных параметрах процесса регламентированную структуру и свойства сварочной проволоки из силуминов.

5. Создано программное обеспечение для автоматизированного проектирования инструмента и технологии производства деформированных полуфабрикатов с применением совмещенных методов обработки.

Реализация работы в промышленности.

Опытная партия сварочной проволоки Св. АК12, полученная по разработанной технологической схеме, включающей литье в электромагнитный кристаллизатор, совмещенную прокатку-прессование и волочение, прошла промышленную апробацию в ФГУП «НПО «Прикладная механика» (г. Железногорск). Установлено, что данная продукция пригодна для пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов и соответствует требованиям ТУ 1-808-274-2003.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на ежегодных традиционных Всероссийских научно-технических конференциях университета цветных металлов и золота с 2005-2007 гг. и СФУ 2008 – 2010 гг.; на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2007 г.); на VI Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (Пенза, 2008 г.); на 67 Международной научно-технической конференции МГТУ им. Носова (г. Магнитогорск, 2009 г.).

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 18 публикациях.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержит 165 страниц машинописного текста, 77 рисунков, 21 таблицу, библиографический список из 121 наименования и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны цель и задачи исследования, показаны актуальность и прикладное значение работы.

В первой главе проанализированы литературные данные об основных тенденциях развития промышленного производства прессованной продукции малого поперечного сечения и проволоки из алюминиевых сплавов. Одной из них является применение совмещенных процессов обработки ме-

талла, позволяющих получить технические и экономические преимущества за счет снижения количества циклов технологии изготовления таких изделий.

Существующие технологии производства пресс-изделий малого поперечного сечения на горизонтальных гидравлических прессах имеют ряд недостатков, основные из которых связанны с дискретностью (прерывностью) и высокой энергоемкостью процесса. С другой стороны существует ряд способов непрерывного прессования, таких как Конформ, Лайнекс и Экстроллинг, которые характеризуются высоким выходом годного, низкими энергозатратами в сравнении с традиционными методами прессования, и возможностью деформации непрерывно-литой заготовки за один цикл обработки.

В работах зарубежных и российских ученых, Б. Авитцура, Р. Гржиба, В.Л. Бережного, М.С. Гильденгорна, Ф.С. Гилевича, Н.Н. Довженко, В.Н. Корнилова В.Н. Перетятько и др. были предложены технические решения, позволяющие реализовать различные варианты процесса совмещенной прокатки-прессования и расширить технологические возможности процесса при получении длинномерных изделий из различных металлов и сплавов. Вместе с тем применение СПП для получения прессованных полуфабрикатов малого поперечного сечения из труднодеформируемых алюминиево-кремниевых сплавов, таких как АК5 и АК12, изучено мало и требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

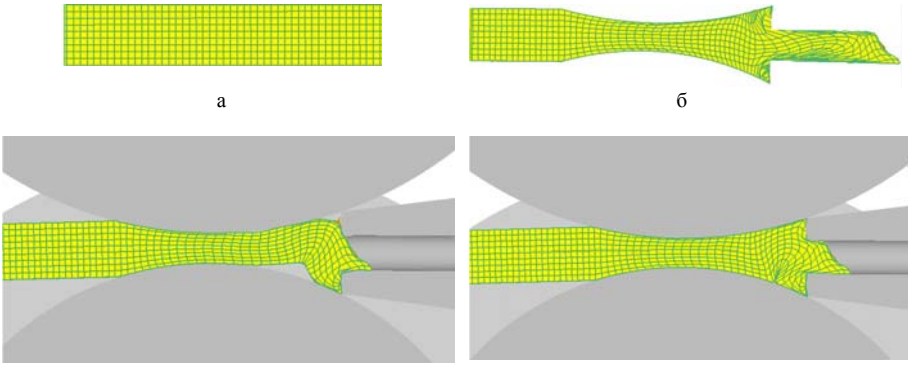
В ряде работ (Д. Ю. Горбунова и др.) для получения данной продукции предлагается использовать технологию, включающую на первом этапе повышение пластических свойств литых заготовок за счет применения комплексного легирования алюминиево-кремниевых сплавов в сочетании с повышенными скоростями охлаждения при литье и прессование на гидравлических прессах литых заготовок на втором этапе. Однако такой способ технологически выгоден при больших объемах производства продукции и достаточно трудоемок, так как включает большое количество металлургических переделов с использованием многочисленных операций деформации и термообработки.

В то же время современный уровень развития технологий литья с использованием электромагнитного кристаллизатора (ЭМК) позволяет получать заготовки небольших размеров с повышенными пластическими свойствами, идеально подходящих для процесса совмещенной обработки труднодеформируемых сплавов.

На основе рассмотренных вопросов и сделанных выводов сформулированы задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты моделирования и теоретических исследований закономерностей изменения параметров очага деформации и температурных условий процесса асимметричной прокатки-прессования. Проведено компьютерное моделирование формоизменения и температурных условий процесса при помощи программного комплекса DEFORM 3D. Анализ формоизменения металла (рис.1) показал, что в зоне про-

катки узлы координатной сетки, располагающиеся на контактной поверхности с валками, опережают центральные слои металла (рис. 1 б). После вертикальной оси, проходящей через центры валков, скорости узлов сетки на периферии и в центре заготовки постепенно выравниваются и становятся одинаковыми (рис. 1 в, г). Далее картина течения металла соответствует традиционному процессу прессования, то есть узлы сетки центральных слоев металла вследствие сравнительно большой степени деформации при прессовании начинают значительно опережать приконтактные слои металла. Величина мертвых зон при этом незначительна.



а б

в г

а – исходная сетка на недеформированной заготовке; б – сетка при установившемся процессе; в – стадия начала распрессовки; г – стадия распрессовки и начала выдавливания пресс-изделия

Рис. 1. Формоизменение металла на различных стадиях процесса СПП

При моделировании температурных условий асимметричного процесса СПП было выявлено, что на начальной стадии процесса заготовка охлаждается за счет контакта с валками, затем происходит ее разогрев за счет выделения деформационного тепла на стадиях прокатки и прессования (рис. 2).

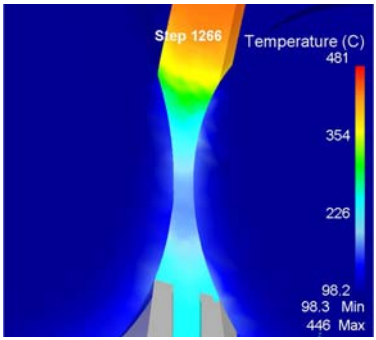


Рис. 2. Моделирование температурных условий асимметричного процесса СПП

Таким образом, одним из принципиальных выводов, полученных при моделировании, является тот факт, что на контактных поверхностях валков, как в зоне прокатки, так и в зоне распрессовки действуют активные силы трения, величина которых и определяет возможность реализации процесса СПП.

Проведены теоретические исследования реализуемости асимметричного процесса СПП на базе применения метода баланса мощностей. В соответствии с ним мощность, подводимая валками за счет сил трения, должна быть больше, либо равной мощности, затрачиваемой на выдавливание металла через канал матрицы. В результате теоретического анализа было получено выражение для определения реализуемости процесса, названное коэффициентом реализуемости $К_у = \frac{P_1 - P_2\lambda}{P_1} \cdot 100\%$, где P_1 – усилие, подводимое валками за счет сил трения, P_2 – усилие, необходимое для выдавливания металла через отверстие матрицы, λ – коэффициент, характеризующий отношение текущей скорости металла к скорости валков. Установлено (рис. 3), что для гарантированного протекания процесса СПП для силуминов степень деформации при прокатке должна быть не менее ε=50% (рис.3 а), причем, чем больше вытяжка при прессовании μ, тем величина ε должна быть выше (рис. 3 б).

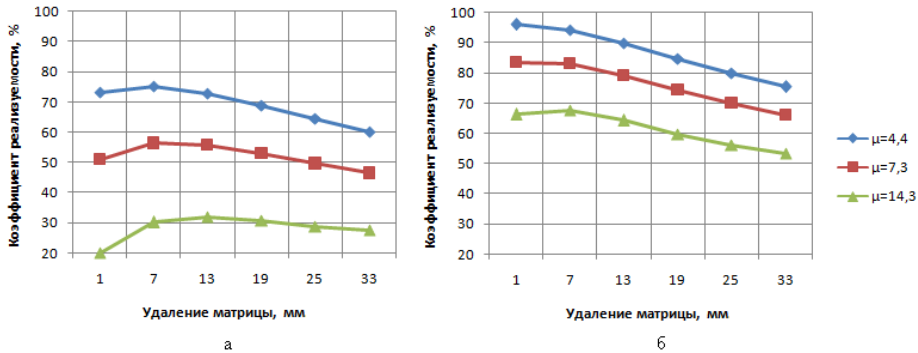


Рис. 3. Результаты расчета реализуемости процесса СПП для различных степеней высотной деформации ε = 50% (а), ε = 70% (б) и величине коэффициента вытяжки μ при прессовании

Для анализа процесса СПП с учетом асимметрии путем совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности решена задача по поиску нейтральных углов γ_1 и γ_2, определяющих протяженность зон действия активных и реактивных сил трения на валках. Получены следующие формулы для их расчета:

– для валка с выступом

$$\gamma_1 = -\gamma_2 \frac{R_2\tau_2}{R_1\tau_1}[1+\frac{h_1}{2b}(2+\cos\Psi_\alpha + K_\sigma \cos\Psi_\theta)] + \frac{1}{8\tau_1}(p_{1\theta}\theta_1^2 - p_{1\alpha}\alpha_1^2) + \frac{1}{4}(\alpha_1 + K_\sigma\theta_1) +$$
$$+\frac{R_2}{8R_1\tau_1}(p_{2\theta}\theta_2^2 - p_{2\alpha}\alpha_2^2) + \frac{R_2\tau_2}{4R_1\tau_1}(\alpha_2 + K_\sigma\theta_2) + \frac{R_2 h_1}{2R_1 b}(\alpha_2\cos\Psi_\alpha + K_\sigma\theta_2\cos\Psi_\theta) - \frac{P_2}{4R_1\tau_1 b}, \quad (1)$$

– для валка с ручьем

$$\gamma_2 = \left[\frac{R_1}{8R_1\tau_1}(p_{1\theta}\theta_1^2 - p_{1\alpha}\alpha_1^2) + \frac{R_2\tau_2 h_1}{2R_1\tau_1 b}(\alpha_2 + K_\sigma\theta_2) - \frac{R_2 h_1}{2R_1 b}(\alpha_2\cos\Psi_\alpha + K_\sigma\theta_2\cos\Psi_\theta)\right] \cdot \frac{b}{h(1-\frac{\cos\Psi_\alpha + \cos\Psi_\theta}{2})}, \quad (2)$$

где $\alpha_i, \theta_i, \gamma_i$ - центральные углы захвата, положения матрицы и поверхности реактивного трения на валках; τ_1, τ_2 – касательные напряжения на контактных поверхностях валков и деформируемого металла; $p_{i\alpha}, p_{i\theta}$ – нормальные контактные напряжения на валках в зоне прокатки и прессования; b - ширина закрытого калибра;

$$\Psi_\alpha = arctg[\frac{\alpha_2 + \gamma_2}{2(1+h_1/2R_2)}], \quad (3)$$

$$\Psi_\theta = arctg[\frac{\theta_2 + \gamma_2}{2(1+h_1/2R_2)}]; \quad (4)$$

P_2 – усилие для выдавливания металла через матрицу, определяемое по формуле

$$P_2 = [\frac{2tg(\alpha_{ПР}/2) + 1/\sqrt{3}}{\sin\alpha_{ПР}}]F_м\sigma_{S\theta}\ln\mu, \quad (5)$$

$\alpha_{ПР}$ – угол наклона образующей упругой зоны при прессовании профиля диаметром d через матрицу высотой $h_{матр}$;

$$K_\sigma = \sigma_{S\theta}/\sigma_{S\alpha}, \quad (6)$$

здесь $\sigma_{S\alpha}$ и $\sigma_{S\theta}$ – величина сопротивления деформации металла в зонах прокатки и прессования соответственно.

Схема к расчету параметров очага деформации при совмещенной прокатке-прессовании представлена на рис. 4.

С использованием формул (1) и (2) получены массивы данных расчетных параметров во всем диапазоне варьируемых факторов. Так для случая прокатки-прессования на установке СПП 200, геометрический очаг деформации которого показан на рис. 4, эти параметры составили: α_1=12,55, α_2=16,8, γ_1=8°55′, γ_2=16°05′. Сравнение расчетных значений и результатов экспериментальных исследований показало, что полученную аналитическую модель

можно рекомендовать для выполнения практических расчетов параметров процесса СПП.

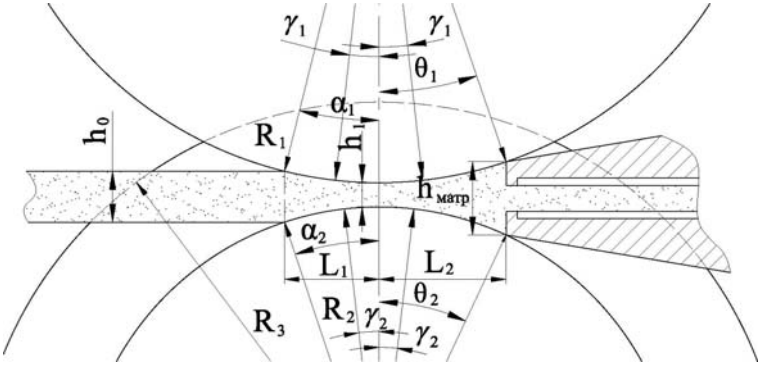


Рис. 4. Схема к расчету размеров очага деформации при совмещенной прокатке-прессовании

С использованием полученной модели путем решения одномерной краевой задачи теплопроводности при граничных условиях второго и четвертого рода, получены зависимости для расчета изменения температуры металла и инструмента при различных условиях прокатки-прессования сплавов АК5 и АК12 без учета и с учетом охлаждения инструмента. Результаты расчетов по длине очага деформации, определяемой отношением длины каждой характерной зоны L_i к его общей протяженности L, представлены на рис. 5.

Анализ приведенных графиков подтвердил закономерности изменения температурных условий, характерных для СПП, полученных при моделировании, и позволил выявить оптимальный интервал температур подогрева инструмента (до 150°С) и охлаждения матрицы (на 20-50°С), при котором процесс деформации будет гарантировано реализован. При несоблюдении этих условий пресс-изделие будет иметь высокую выходную температуру, что может привести к снижению качества продукции вплоть до появления брака (температурных трещин).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса получения деформированных полуфабрикатов из силуминов с использованием метода совмещенной прокатки-прессования и волочения.

Исследования проводились на литых заготовках, полученных в электромагнитном кристаллизаторе, из сплавов марок АК5 и АК12, химические составы которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплавов АК5 и АК12

Марка сплава	Al	Mg	Mn	Ti	Fe	Cu	Si	Zn
АК12	Основа	0,2	0,01	0,07	0,24	0,03	12,6	0,01
АК5	Основа	0,01	0,02	0,10	0,33	0,03	5,3	0,01

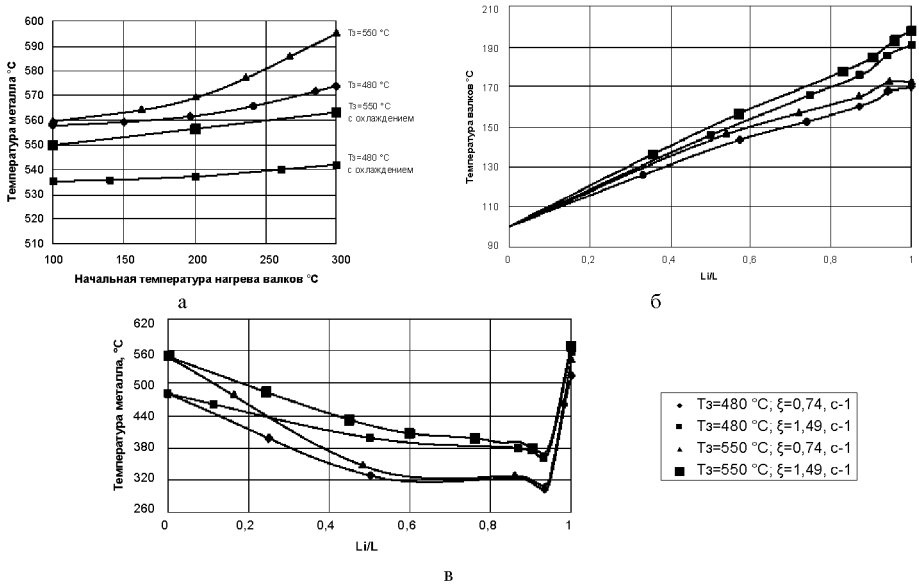
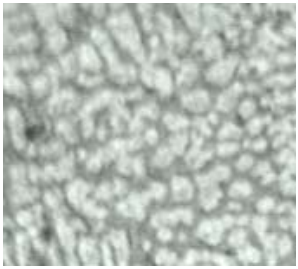


Рис. 5. Результаты расчета температурных условий обработки методом СПП для сплава АК12: а – зависимость расчетной температуры металла на выходе из матрицы от начальной температуры нагрева валков и температуры нагрева заготовки ($T_з$) для сплава АК12; б – зависимость расчетной температуры валков от относительной длины очага деформации и скорости деформации при температурах заготовки $T_з$=*480 и 550* ^0C ; в – зависимость расчетной температуры металла от относительной длины очага деформации L_i/L и скорости деформации при температурах заготовки $T_з$=*480 и 550* ^0C;

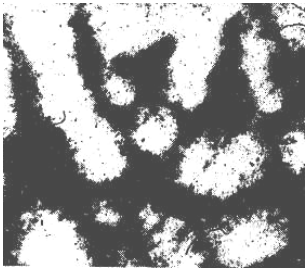
В ходе исследований варьируемыми факторами являлись: температура (Т), скорость деформации (ξ) и коэффициент вытяжки (μ), рассчитываемый как $\mu = F_{заг}/F_{изд}$, где $F_{заг}$ и $F_{изд}$ – соответственно площадь поперечного сечения заготовки и прессованного полуфабриката. С целью получения комплекса экспериментальных данных для регрессионного анализа результатов теоретических исследований и моделирования процесса СПП каждый из этих факторов варьировался в заданном диапазоне значений. Температура изменялась от 480 до 550 °С, скорость деформации от 0,74 до 1,49 $с^{-1}$, вытяжка от 4,4 до 14,3. Замеряемыми параметрами являлись усилие, действующее на матрицу и на валки в процессе деформации металла.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. На первом этапе исследований при помощи ЭМК получали литые заготовки из сплавов АК5 и АК12 диаметром 15 мм. Анализ их микроструктуры при различном увеличении показал, что эвтектика имеет тонкодифференци-

рованное строение, а частицы кремния в ней настолько дисперсные, что не различимы даже при увеличении 1500 крат (рис. 6).



а



б

Рис. 6. Микроструктура литого прутка из сплава АК12:
а – увеличение 500 крат, б – увеличение 1500 крат

Таким образом, слитки, полученные с помощью ЭМК, обладают повышенными пластическими свойствами и могут подвергаться обработке давлением при достаточно больших степенях деформации. На полученных литых заготовках проводили замеры микротвердости и определяли механические свойства, данные по которым представлены в четвертой главе.

На втором этапе для экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки использовалась установка СПП-200, в составе которой имелся электродвигатель переменного тока мощностью 40 КВт со скоростью вращения 900 об/мин, коробка передач, двухступенчатый редуктор с передаточным числом i=40 и максимальным моментом на выходном валу 10 кН×м, шестеренная и прокатная клети. Установка была оснащена тензометрической аппаратурой и обеспечила проведение ряда экспериментов по изучению влияния варьируемых параметров на силовые условия процесса.

Результаты экспериментальных исследований по энергосиловым параметрам процесса СПП приведены на рисунках 7 – 8.

В результате анализа опытных данных были сделаны выводы, подтверждающие общеизвестные положения теории обработки металлов давлением и результаты исследований, выполненных ранее другими авторами, а именно:

- с увеличением температуры заготовки снижаются усилия на матрицу и валки;
- увеличение степени деформации при прессовании ведет к росту энергосиловых параметров процесса СПП;
- увеличение скорости деформации металла ведет к снижению усилия на валках и на матрице.

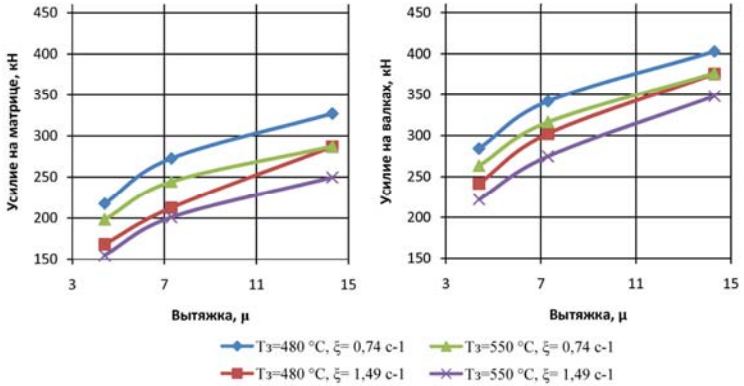


Рис. 7. Зависимость энергосиловых параметров процесса СПП от вытяжки (μ), температуры нагрева заготовки ($T_з$) и скорости деформации (ξ) сплава АК5

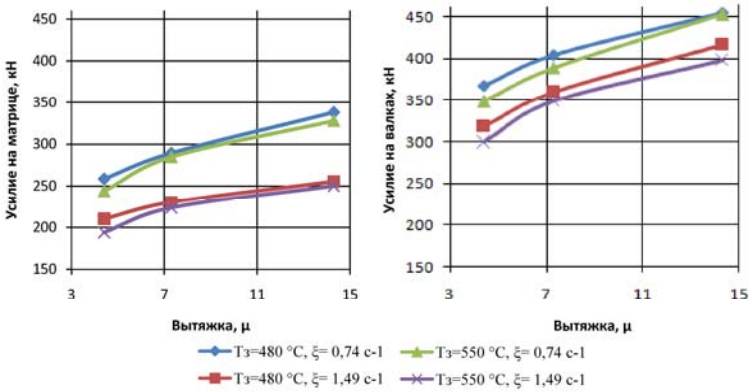


Рис. 8. Зависимость энергосиловых параметров процесса СПП от вытяжки (μ), температуры нагрева заготовки ($T_з$) и скорости деформации (ξ) сплава АК12

В результате последующей обработки массива экспериментальных данных получены регрессионные зависимости для определения энергосиловых параметров процесса СПП сплавов АК5 и АК12, имеющие вид:

$$P = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{T-515}{35}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{\ln\mu - 2,07}{1,18}\right) + a_3 \cdot \left(\frac{\xi - 1,115}{0,75}\right) +$$
$$a_{12} \cdot \left(\frac{T-515}{35}\right) \cdot \left(\frac{\ln\mu - 2,07}{1,18}\right) + a_{23} \cdot \left(\frac{\ln\mu - 2,07}{1,18}\right) \cdot \left(\frac{\xi - 1,115}{0,75}\right) + \qquad (7)$$
$$a_{31} \cdot \left(\frac{T-515}{35}\right) \cdot \left(\frac{\xi - 1,115}{0,75}\right) + a_{123} \cdot \left(\frac{T-515}{35}\right) \cdot \left(\frac{\ln\mu - 2,07}{1,18}\right) \cdot \left(\frac{\xi - 1,115}{0,75}\right),$$

где T – температура нагрева заготовки, ξ – скорость деформации, μ – коэффициент вытяжки, a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{23}, a_{31}, a_{123} – коэффициенты регрессии, значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов регрессии для расчета энергосиловых параметров процесса СПП сплавов АК5 и АК12

Усилие	Значения коэффициентов регрессии							
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{23}	a_{31}	a_{123}
для сплава АК5								
на валках	333,45	7,375	42,25	1,775	-20,85	-15,6	19,3	-19,43
на матрице	236,29	-13,7	51,6	21,3	-5,5	1,9	1,1	-0,5
для сплава АК12								
на валках	391,79	12,463	38,44	-13,71	-7,44	-9,26	16,81	-12,39
на матрице	259,85	-1,9	33,2	-32,3	5,8	-7,7	-0,8	-0,5

Уравнения (7) прошли проверку на адекватность экспериментальным данным с использованием критерия Фишера и могут быть рекомендованы для расчета энергосиловых параметров процесса СПП для сплавов АК5 и АК12 при проектировании технологий и устройств совмещенной прокатки-прессования силуминов

На третьем этапе исследований полученный после СПП пруток подвергали волочению по режиму с изменением диаметров 7 – 5,5 – 4 – 3 – 2,7 – 2,4 – 2,2 – 2 (мм) без промежуточных отжигов и изготовили проволоку диаметром 2 мм. Для получения проволоки меньшего поперечного сечения (диаметром 1,4 мм) проводили отжиг по следующему режиму: температура нагрева T=400°C, время выдержки 1,5 часа. На рисунке 9 приведены микроструктуры полученных полуфабрикатов, из которых видно, что структура мелкозернистая, а твердый раствор алюминия и эвтектика располагаются равномерно, при этом наблюдается ориентировка зерен вдоль оси деформации и отсутствуют дефекты.

а б в

Рис. 9. Микроструктуры полуфабрикатов из сплава АК12 (х1500):
а – прессованный пруток (поперечное сечение) после СПП диаметром 7 мм,
б – проволока (продольное сечение) после волочения диаметром 2 мм,
в – проволока (продольное сечение) после отжига и волочения диаметром 1,4 мм

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что горячая обработка литой заготовки из ЭМК методом совмещенной прокатки-прессования и последующее волочение дало возможность получать проволоку с высоким уровнем механических свойств и мелкозернистой структурой, при реализации многократных деформаций без применения промежуточных отжигов.

В четвертой главе представлены новые технические решения по конструкции оборудования и инструмента и технологические решения по получению сварочной проволоки из силуминов на базе применения методов совмещенной обработки алюминиевых сплавов.

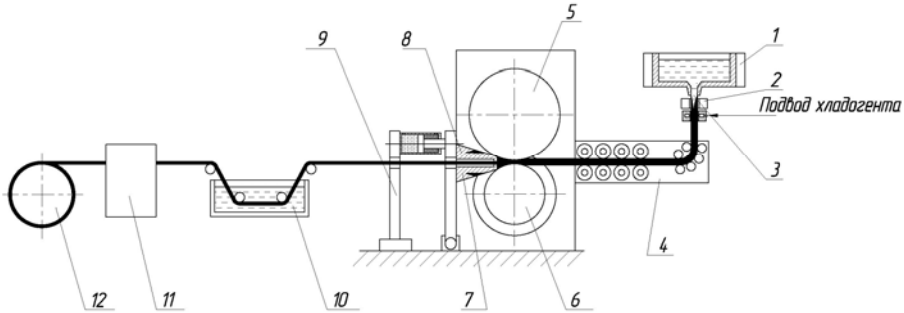
Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла, защищенная патентом РФ №67492, является базовым техническим решением для разработки новой технологии получения проволоки из силуминов. Она (рис. 10) включает печь-миксер, электромагнитный кристаллизатор, правильно-задающее устройство, деформирующий узел, устройство охлаждения и устройство намотки. Деформирующий узел состоит из валка с ручьем и валка с выступом, образующих рабочий калибр, на выходе из которого установлена матрица с клиновидными полостями для охлаждения, а далее расположен деформирующий блок для калибровки пресс-изделий.

В процессе работы расплавленный металл из печи-миксера 1 поступает в электромагнитный кристаллизатор 2 и через питатели 3 закристаллизовавшийся слиток с помощью правильно-задающего устройства 4 поступает в калибр, образованный валком с выступом 5 и валком с ручьем 6. Далее заготовка подвергается пластической деформации и экструдируется в виде пресс-изделия через матрицу 7, поджатую гидроцилиндром 9. Матрица охлаждается с помощью хладогента, поступающего в клиновидные полости 8, а заготовка сматывается в бухту на устройстве намотки 12, пройдя перед этим охлаждение в емкости узла охлаждения 10 и калибровочную обработку в блоках 11.

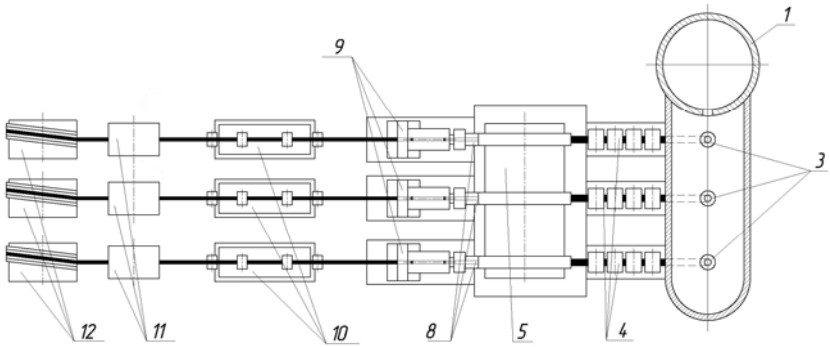
Для увеличения производительности установки в электромагнитном кристаллизаторе 2 с помощью питателей 3 может быть получено одновременно несколько заготовок по числу калибров на валках 5 и 6, при этом они экструдируются через матрицы 7, перекрывающие эти калибры, и обрабатываются далее с использованием необходимого количества гидроцилиндров 9, охлаждающих устройств 10, калибровочных блоков 11 и устройств для намотки 12.

Кроме того, предложены различные варианты устройств, обеспечивающих расширение технологических возможностей и повышение качества выпускаемой продукции. Например, для процессов, когда заготовка с требуемым для обработки уровнем пластических свойств не может быть получена с помощью кристаллизатора, предлагается использовать установку для непрерывного литья, прокатки и прессования (патент РФ № 73245) которая включает печь-миксер наклонного типа с регулятором подачи расплава в ка-

либр валков, валок с ручьем и валок с выступом, расположенные в станине, имеющие полости для охлаждения и образующие закрытый калибр, перекрытый на выходе матрицей с клиновидными полостями для охлаждения.



а



б

1 – печь-миксер, 2 – электромагнитный кристаллизатор, 3 – питатели, 4 – правильно-задающие устройства, 5 – валок с выступом, 6 – валок с ручьем, 7 – матрица, 8 – клиновидные полости, 9 – гидроцилиндры, 10 – узлы охлаждения, 11 – калибровочные блоки, 12 - моталки

Рис. 10. Общий вид установки литья, прокатки и прессования (а) и ее вид сверху (б)

С целью автоматизации процессов проектирования оснастки и оборудования для применяемых методов совмещенной обработки, а также технологических расчетов параметров процесса деформации, с использованием среды объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0 создано программное обеспечение. Оно включает имитационные модели установок совмещенной обработки, модели аналитического определения реализуемости процесса СПП и расчета энергосиловых параметров, а также блоки проектирования прессового и валкового инструмента.

Технические решения и разработанное программное обеспечение внедрены в учебный процесс ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный универси-

тет» и используются при обучении студентов специальности 150106 «Обработка металлов давлением».

На базе новых технических решений была разработана технология получения сварочной проволоки Св. АК12, которая состояла из следующих технологических переделов. На первом этапе при помощи ЭМК получали литую заготовку диаметром 15 мм с повышенными пластическими свойствами. Далее полученные заготовки нагревались до температуры 550 °С и подвергались СПП со скоростью деформации ξ=0,74 $с^{-1}$ и вытяжкой μ=7,3. На последнем этапе полученный пруток диаметром 7 мм подвергали холодной обработке методом волочения для получения проволоки диаметром 2 мм. Результаты механических испытаний на каждом из этапов технологической обработки представлены в табл. 3, при этом следует отметить, что пластические и прочностные свойства полученных литых заготовок значительно превышают требования ГОСТ Р 50511-93, что позволяет получить деформируемые полуфабрикаты заданных размеров.

На базе проведенных исследований были получены и переданы на ФГУП «НПО «Прикладная механика» (г. Железногорск) опытные партии сварочной проволоки Св. АК12, предназначенной для пайки волноводных трактов, применяемых в космической и авиационной технике. В результате испытаний было установлено, что проволока марки Св. АК12, полученная по предлагаемой технологии, соответствует требованиям ТУ 1-808-274-2003 и может быть использована в производстве, что подтверждено актом опытно-промышленной апробации и актом внедрения.

Таблица 3 – Механические свойства литой заготовки, прутка и проволоки из сплавов АК5 и АК12

Марка сплава	Вид изделия	Механические свойства	
		$\sigma_в$, МПа	δ, %
АК5	литая заготовка диаметром 15,0 мм	270,0	15,0
	пруток диаметром 7,0 мм	280,3	9,0
	проволока диаметром 3,0 мм;	382,0	4,8
	проволока диаметром 2,6 мм;	376,7	4,0
	проволока диаметром 2,0 мм;	413,8	2,8
АК12	литая заготовка диаметром 15 мм	290,8	14,8
	пруток диаметром 7,0 мм	201,1	20,2
	проволока диаметром 3,0 мм;	402,2	4,0
	проволока диаметром 2,5 мм;	425,1	3,0
	проволока диаметром 2,0 мм;	445,7	1,5

Таким образом, в результате проведенных исследований была разработана и внедрена новая технология производства сварочной проволоки из силуминов на основе применения совмещенных методов обработки. Использование данной технологии позволило существенно снизить себестоимость производства продукции за счет минимизации количества операций и получить качественные деформированные изделия малого поперечного сечения

из малопластичных алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов).

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С использованием результатов компьютерного моделирования формоизменения металла и теоретических методов исследований определены условия реализуемости и установлены закономерности изменения основных параметров асимметричного процесса СПП, при этом получены зависимости изменения нейтральных углов на валках разного диаметра от соотношения радиусов и дуг захвата валков, а также степени высотной деформации.

2. Решена одномерная краевая задача теплопроводности по определению температуры металла вдоль очага деформации с учетом разности диаметров валков и испарительного охлаждения рабочего инструмента (матрицы и валков), а также установлены закономерности ее изменения от параметров очага деформации для исследуемых сплавов АК5 и АК12, при этом результаты компьютерного моделирования подтверждают полученные закономерности.

3. Проведены экспериментальные исследования по реализации асимметричной прокатки-прессования с использованием литых заготовок из сплавов АК5 и АК12, изготовленных при помощи электромагнитного кристаллизатора, и получены опытные данные по технологическим и энергосиловым параметрам процесса.

4. Экспериментально установлены общие закономерности влияния температуры заготовки, вытяжки и скорости деформации на энергосиловые параметры асимметричного процесса СПП при деформировании силуминов.

5. Получены регрессионные формулы для определения усилий, действующих на матрицу и валки для исследуемых сплавов, и представлены графические зависимости этих параметров процесса от варьируемых факторов.

6. Поведены металлографические исследования структуры и определены механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов АК5 и АК12 на разных этапах совмещенной обработки.

7. Разработаны новые технические решения и технология производства сварочной проволоки из сплава АК12, а также программное обеспечение для ее сопровождения, внедренные в учебный процесс и производство.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Соколов, Р. Е. Подсистема САПР непрерывного прессования [Текст] /Р.Е. Соколов // Совершенствование технологии производства цветных металлов: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конферен-

ции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сост.: Сувейзда В. В.; ГУО ВПО «ГУЦМиЗ». - Красноярск, 2005. - с 123

2. Соколов, Р. Е. Исследование процесса совмещенной прокатки-прессования алюминиевых сплавов [Текст] /Р. Е. Соколов, Д. В. Кравцов // Совершенствование методов поиска и разведки технологий добычи и переработки полезных ископаемых: Сборник материалов Межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сост.: Сувейзда В. В.; ГУО ВПО «ГУЦМиЗ». - Красноярск, 2006. - с. 212-213.

3. Соколов, Р. Е. Проектирование технологии непрерывного прессования пресс-изделий малого сечения из силуминов [Текст] /Р. Е. Соколов, Ю. Г. Востоков, Д. С. Ворошилов // Совершенствование технологий производства цветных металлов: Сборник материалов Межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сост.: Сувейзда В. В.; ИЦМиЗ СФУ. - Красноярск, 2007. - с. 196-197.

4. Соколов, Р. Е. Разработка устройств и технологий совмещенной обработки труднодеформируемых сплавов алюминия [Текст] / Р. Е. Соколов, Е. С. Лопатина, Д. С. Ворошилов, П. О. Широков// Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 ч. Сост.: Сувейзда В. В.; МИОЦ ВПО «СФУ». - Красноярск, 2008. - с. 159-161.

5. Соколов, Р. Е. Экспериментальные исследования совмещенных процессов получения прутков из различных алюминиевых сплавов [Текст] / Д. С. Ворошилов, Р. Е. Соколов, Р. И. Галиев, С. В. Туманов Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 ч. Сост.: Сувейзда В. В.; МИОЦ ВПО «СФУ». - Красноярск, 2008. -с. 161-164.

6. Соколов Р. Е. Разработка новой технологии комбинированной обработки силуминов [Текст] / С. Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Ю. А. Горбунов, Д. Ю. Горбунов, Е. С. Лопатина, Р. Е. Соколов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. Выпуск 5(12). Красноярск, 2006, с. 233-235. **(рецензируемое издание)**.

7. Соколов Р. Е. Проектирование инструмента и технологии для прессования полых профилей комбинированными методами обработки [Текст] / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Р. Е. Соколов, А. С. Пещанский, С. А. Плетюхин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. Выпуск 5 (12). Красноярск, 2006, с. 235-238. **(рецензируемое издание)**.

8. Соколов Р. Е. Исследование возможности применения процесса совмещенной прокатки-прессования для получения деформированных изделий из силуминов [Текст] / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Р. Е. Соколов, Е. С. Лопатина, И. С. Гоголь, Р. И. Галиев, С.В. Беляев // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: Сборник материалов Международной НПК. - Красноярск, 2006, с.228 -230.

9. Соколов Р. Е. Моделирование тепловых условий процесса совмещенной прокатки-прессования [Текст] / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, И. Н. Довженко, С. В. Беляев, Р. Е. Соколов // Стратегические приоритеты и инновации в производстве цветных металлов и золота: Сборник материалов Международной НПК. - Красноярск, 2006, с. 227 - 228. Довженко Н. Н., Довженко И. Н., Беляев С. В., Соколов Р. Е.

10. Соколов Р. Е. Новые технологии и оборудование для обработки цветных металлов и сплавов [Текст] / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, В. Н. Тимофеев, И. Н. Довженко, М. В. Первухин, Р. Е. Соколов, Е. С. Лопатина // Моделирование и развитие процессов ОМД. Межрегиональный сб. науч. трудов. - Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2007.- с.259 -262.

11. Соколов Р. Е. Современные технологии и устройства для обработки труднодеформируемых сплавов цветных металлов [Текст] / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Р. Е. Соколов, И. Н. Довженко, С. В. Беляев, А. А. Катарева // Материалы и технологии XXI века. Сборник статей VI Международной научно-технической конференции.- Пенза, 2008. - с. 86 - 88.

12. Соколов, Р. Е. Разработка устройств и технологии для получения проволоки из труднодеформируемых алюминиевых сплавов с применением методов совмещенной обработки [Текст] / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Р. Е. Соколов, С. В. Беляев, Е. С. Лопатина, Н. А. Барков, Д. С. Ворошилов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2009. - №4 – С. 30 – 34. **(рецензируемое издание)**.

13. Патент РФ № 67492. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования [Текст] / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Тимофеев В. Н., Соколов Р. Е., Первухин М. В., Беляев С. В., Пещанский А. С., Телегин А. В., Виноградов О. О. Опубл. 27.10.2007, Бюл. №30.

14. Патент РФ №68387. Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей [Текст] /Беляев С. В., Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Соколов Р. Е., Плетюхин А. С., Телегин А. В., Киселев А. Л. Опубл. 27.11.2007, Бюл. №33.

15. Патент РФ №2334574. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей [Текст] / Сидельников С. Б., Беляев С. В., Довженко Н. Н., Соколов Р. Е., Пещанский А. С., Плетюхин С. А., Рудницкий Э. А. Опубл. 27.09.2008, Бюл. №27.

16. Патент РФ № 70828. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей [Текст] / Беляев С. В., Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Довженко И. Н., Соколов Р. Е., Телегин А. В., Разумкин В. В., Пещанский А. С, Плетюхин С. А. Опубл. 20.02.2008, Бюл. №5.

17. Патент РФ №2335376. Устройство для непрерывнго литья, прокатки и прессования профилей [Текст] / Сидельников С. Б., Беляев С. В., Довженко Н. Н., Соколов Р. Е., Лопатина Е. С., Усков И. В., Столяров А. В., Виноградов О. О. Опубл. 10.10.2008, Бюл. №28.

18. Патент РФ №73245. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов [Текст] / Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Лопатина Е. С., Соколов Р. Е., Виноградов О. О., Пещанский А. С., Беляев С. В. Опубл. 20.05.2008, Бюл. №14.

Подписано в печать _____.
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии ИПК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а