На правах рукописи

САМЧУК Антон Павлович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМ Al-Mg И Al-Fe С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор **Сидельников Сергей Борисович**

Официальные оппоненты:

Песин Александр Моисеевич, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Рааб Георгий Иосифович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НИИ физики перспективных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Ведущая организация:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), г. Самара.

Защита состоится 19 декабря 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте http://www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан «____»_____2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10 Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В последнее время идеи совмещенной обработки с применением операций прокатки, прессования и непрерывного литья получили развитие и находят все большее применение в производстве длинномерной продукции из алюминиевых сплавов. Это объясняется тем, что проведены всесторонние исследования этих процессов и подготовлены фундаментальные основы для внедрения их в производство.

Однако в большей степени объектом исследований были технический алюминий марок А5Е и А7Е, а также мягкие алюминиевые сплавы типа АД1, АВЕ, АД31, АД35, т.е. 1XXX и 3XXX серий, которые достаточно легко деформируются в процессе совмещенной прокатки-прессования и обладают высокой технологичностью. Практическим результатом освоения производства из них, например, катанки, могут служить технология совмещенного литья с использованием роторного кристаллизатора и прокатки-прессования на установке СЛИПП-4, внедренная на Иркутском алюминиевом заводе.

Попытки получить качественную продукцию из твердых сплавов методом совмещенной прокатки-прессования не всегда приводили к положительным результатам, так как эти сплавы имеют узкий температурно-скоростной диапазон обработки и повышенные энергосиловые параметры, что может привести к появлению температурных трещин или поломке оборудования и инструмента. К таким сплавам можно отнести сплавы серий 4XXX, 5XXX, 8XXX и др.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка комплекса технических и технологических решений для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов алюминия, трудно поддающихся деформации, с применением совмещенных методов обработки. Решение этой задачи связано с анализом формоизменения металла и оценкой энергосиловых параметров при совмещении и реализации операций прокатки и прессования, а также непрерывного литья. Важным условием решения этой задачи является также точное определение реологических свойств таких сплавов в достаточно широком диапазоне изменения температурно-скоростных условий и при высоких степенях и скоростях деформации, характерных для прессования.

Данная работа выполнялась в рамках Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» в соответствии с договором Министерства образования и науки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки», а также по договорам с ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Степень разработанности темы: В области совмещенной обработки алюминиевых сплавов учеными института цветных металлов Сибирского

федерального университета проведены обширные теоретические и экспериментальные исследования. Однако по-прежнему задача получения деформированных полуфабрикатов на установках совмещенной обработки из алюминиевых сплавов, трудно поддающихся деформации, в том числе сплавов систем Al-Mg и Al-Fe, требует проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Целью исследований является создание комплекса технических и технологических решений для повышения эффективности производства длинномерных деформированных полуфабрикатов круглого поперечного сечения из алюминиевых сплавов АМг6, АВ87, 8176 методом совмещенной обработки с использованием операций литья, прокатки и прессования.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

– изучение реологических свойств алюминиевых сплавов марок АМг6, АВ87, 8176 в диапазоне температурно-скоростных и деформационных параметров, характерных для процессов совмещенной обработки, с использованием метода горячего кручения;

– расчёт энергосиловых параметров и моделирование в программном пакете DEFORM-3D формоизменения и температурно-скоростных условий совмещенной обработки для исследуемых сплавов;

– проведение экспериментальных исследований по получению длинномерных полуфабрикатов круглого поперечного сечения (прутков) из сплавов АМг6, АВ87, 8176 методами совмещенной обработки;

– проведение металлографических исследований для изучения структуры и механических свойств металла полученных полуфабрикатов из исследуемых сплавов;

– проведение промышленной апробации разработанной технологии и получение опытных партий продукции.

Научная новизна полученных результатов исследований:

1. Усовершенствована конструкция установки для определения реологических свойств методом горячего кручения и с ее помощью получены массивы экспериментальных данных по реологическим свойствам деформированных полуфабрикатов из сплавов АМг6, АВ87, 8176.
2. Установлены закономерности изменения реологических свойств деформированных полуфабрикатов, изготовленных из исследуемых сплавов методом совмещенной обработки, и получены аналитические формулы для их определения в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров процесса.
3. На основании результатов аналитических исследований и компьютерного моделирования обоснованы технологические параметры и установлены закономерности их изменения при получении длинномерных полуфабрикатов круглого поперечного сечения из исследуемых сплавов с использованием способов совмещенной обработки.

4. Установлены закономерности изменения механических свойств длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов в зависимости от деформационных и температурно-скоростных параметров совмещенной обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана и защищена патентом РФ №130708 конструкция установки для определения реологических свойств металла методом горячего кручения при различных температурно-скоростных и деформационных режимах испытания.
2. Разработана и защищена патентом РФ №138590 конструкция устройства для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов, на базе которой изготовлена и запущена в производство опытно-промышленная установка совмещенной обработки СПП-400.
3. Создана компьютерная модель процесса совмещенной прокатки-прессования, позволяющая выполнить расчеты формоизменения, температуры, скорости и энергосиловых параметров при варьировании условий совмещенной обработки алюминиевых сплавов.
4. Разработаны технологические режимы и получены опытные партии длинномерных полуфабрикатов круглого поперечного сечения из сплавов АМг6, АВ87, 8176 с требуемым уровнем механических и эксплуатационных свойств.
5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» и аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием основных законов обработки металлов давлением, методов планирования и обработки экспериментальных данных, универсальных методов исследований структуры и свойств металла, а также метода конечных элементов в программном комплексе Deform-3D.

На защиту выносятся:

– результаты экспериментальных исследований реологических свойств алюминиевых сплавов АМг6, АВ87, 8176;
– технические решения по конструкции установок для испытания реологических свойств методом кручения и для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов;
– результаты компьютерного моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования для исследуемых сплавов;
– технологические решения для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АМг6, АВ87, 8176 с применением методов совмещенной обработки, позволяющие получить продукцию с требуемым уровнем механических и эксплуатационных свойств.

Степень достоверности полученных результатов. Обоснована применением научных методов исследований на аттестованном и поверенном оборудовании, компьютерного моделирования и обработки результатов и подтверждена данными

практической реализации опытно-промышленного опробования разработанных рекомендаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях Сибирского федерального университета (г. Красноярск, 2011-2014 гг.); Международных конгрессах «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2013-2018 гг.); Международном научно-техническом конгрессе «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы, инновационные материалы и технологии (г. Москва, 2014 г.), XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering, production engineering and physics» (г. Ченстохова, Польша, 2015 г.), 3-ей международной научно-практической молодежной конференции Magnitogorsk Rolling Practice (г. Магнитогорск, 2018 г.) и др.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 14 печатных трудах, из них 1 статья в издании, входящем в базу цитирования Scopus, 4 статьи из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, и в 3 патентах РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 105 источников, и трех приложений. Основной материал изложен на 110 страницах, включая 24 таблицы и 47 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная и практическая значимости диссертационной работы.

В первой главе приведен анализ требований, предъявляемых к длинномерным деформированным полуфабрикатам из алюминиевых сплавов систем Al-Mg и Al-Fe и методов их получения. Проведен анализ работ, посвященных исследованиям процессов совмещенной обработки и их моделированию. Описаны методики и оборудование для определения реологических характеристик, при этом предпочтение отдано методу горячего скручивания, так как он характеризуется большими величинами и высокими скоростями деформации. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложены результаты изучения реологических свойств и оценки энергосиловых параметров для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов АМг6, АВ87, 8176.

Для расчета энергосиловых характеристик процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП) важно знать реологические свойства исследуемых сплавов, поэтому на первом этапе исследований проводили экспериментальные исследования по их определению на установке горячего скручивания при различных температурно-скоростных параметрах обработки.

Полученные реологические характеристики исследуемых алюминиевых сплавов использовались в расчетах при проектировании новых установок совмещенной обработки металлов давлением, а также для разработки технологии

производства на таких агрегатах. Эти процессы характеризуются высокими степенями и скоростями деформации, поэтому исследования проводили методом кручения. Для исследований использовали специально сконструированную и изготовленную установку для кручения на базе универсального сверлильного станка модели 2Н135, которая была снабжена современным регистрирующим оборудованием, а именно тензостанцией Zet017–T8, бесконтактным оптическим датчиком оборотов ВС 401 и тензометрическим валом собственной разработки. Модернизации был подвергнут также блок управления, отвечающий за регулировку скорости вращения активного захвата. Проведенная модернизация позволила сократить время обработки данных и увеличить точность снимаемых показателей.

На данную установку для испытаний на скручивание получен патент РФ 130708 (рис. 1).

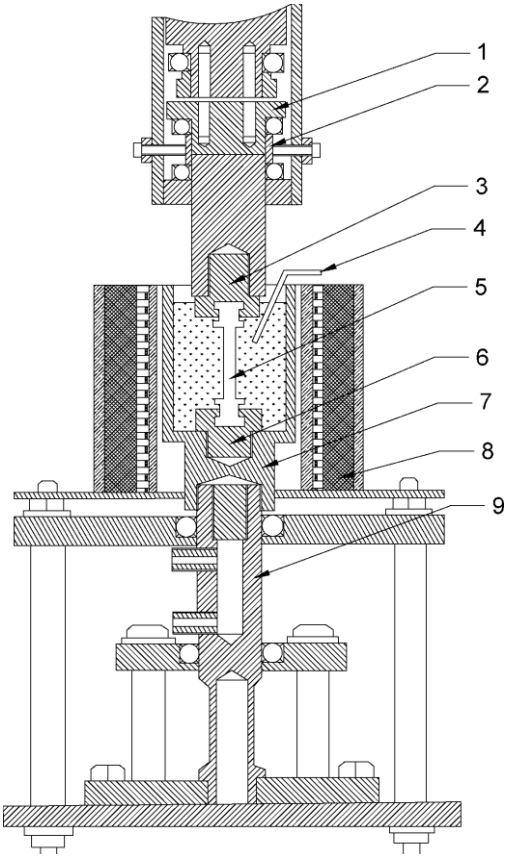


Рисунок 1 – Схема установки для испытаний на горячее скручивание с нагревом в расплаве солей: 1–электромагнитная муфта; 2–тормозные колодки; 3–активный захват; 4–система продувки; 5–образец для скручивания; 6–пассивный захват; 7–стакан; 8–печь; 9–вал с водяным охлаждением

Установка работает следующим образом: образец 5 при скручивании закреплен верхней головкой в активном захвате 3 и нижней в пассивном захвате 6. Пассивный захват закреплен в нижней части стакана 7 с расплавом солей, который помещен в нагревательную печь 8. Замер и регулирование температуры расплава производят с помощью погруженной термопары, подключенной к универсальному блоку управления. Выравнивание температуры расплава в объеме стакана

выполняется с помощью газа аргона. Стакан соединен с валом 9, выполняющим функцию крутильного динамометра, на котором наклеены тензодатчики и который жестко закреплен в основании установки. Для устранения нагрева вала в месте наклейки тензодатчиков его верхняя часть снабжена штуцерами для подвода и отвода охлаждающей воды. Активный и пассивный захваты устанавливаются строго вертикально с соблюдением максимальной соосности между ними. Активный захват, выполненный с возможностью вращения вокруг оси, и приводится в движение от электродвигателя электромагнитной муфтой 1, передавая крутящий момент на вал 9 через образец 5. Изменение крутящего момента на валу фиксируется тензодатчикам. После отключения электромагнитной муфты привод активного захвата останавливается за счет тормозных колодок 2.

По методике испытаний на горячее скручивание, разработанной на кафедре обработки металлов давления (ОМД) института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) СФУ, были проведены исследования для образцов каждого исследуемого алюминиевого сплава, по которым на каждую точку брали не менее трех образцов заданного диаметра. Результатами данных исследований являются кривые зависимости сопротивления деформации от температуры, степени и скорости деформации, представленные в виде графиков на рисунке 2. В программном пакете MathCad проведена их аппроксимация и рассчитаны коэффициенты для приведенного ниже уравнения, погрешность расчета по которому не превышает 2%

$$\sigma_S = a_0 \exp^{a_1 T} \exp^{a_2} \exp^{a_3/\varepsilon} (1+\varepsilon)^{a_4 T} \exp^{a_5 \varepsilon} \xi^{a_6 T} \qquad (1)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6 – реологические коэффициенты (табл. 1), T – температура, °C; ε – степень деформации; ξ– скорость деформации, c^{-1}.

Таблица 1 – Реологические коэффициенты для определения σ_s

Коэффициенты	Сплав		
	АМг6	АВ87	8176
a_0	$2{,}023 \times 10^{3}$	810,765	$1{,}36 \times 10^{3}$
a_1	$-7{,}224 \times 10^{-3}$	$-7{,}608 \times 10^{-3}$	$-9{,}918 \times 10^{-3}$
a_2	0,022	0,05	0,066
a_3	$-4{,}792 \times 10^{-5}$	$-2{,}341 \times 10^{-3}$	$-2{,}58 \times 10^{-3}$
a_4	$3{,}506 \times 10^{-4}$	$7{,}3 \times 10^{-4}$	$2{,}717 \times 10^{-4}$
a_5	-0,165	-0,196	-0,135
a_6	$3{,}931 \times 10^{-4}$	$5{,}20 \times 10^{-4}$	$4{,}35 \times 10^{-4}$

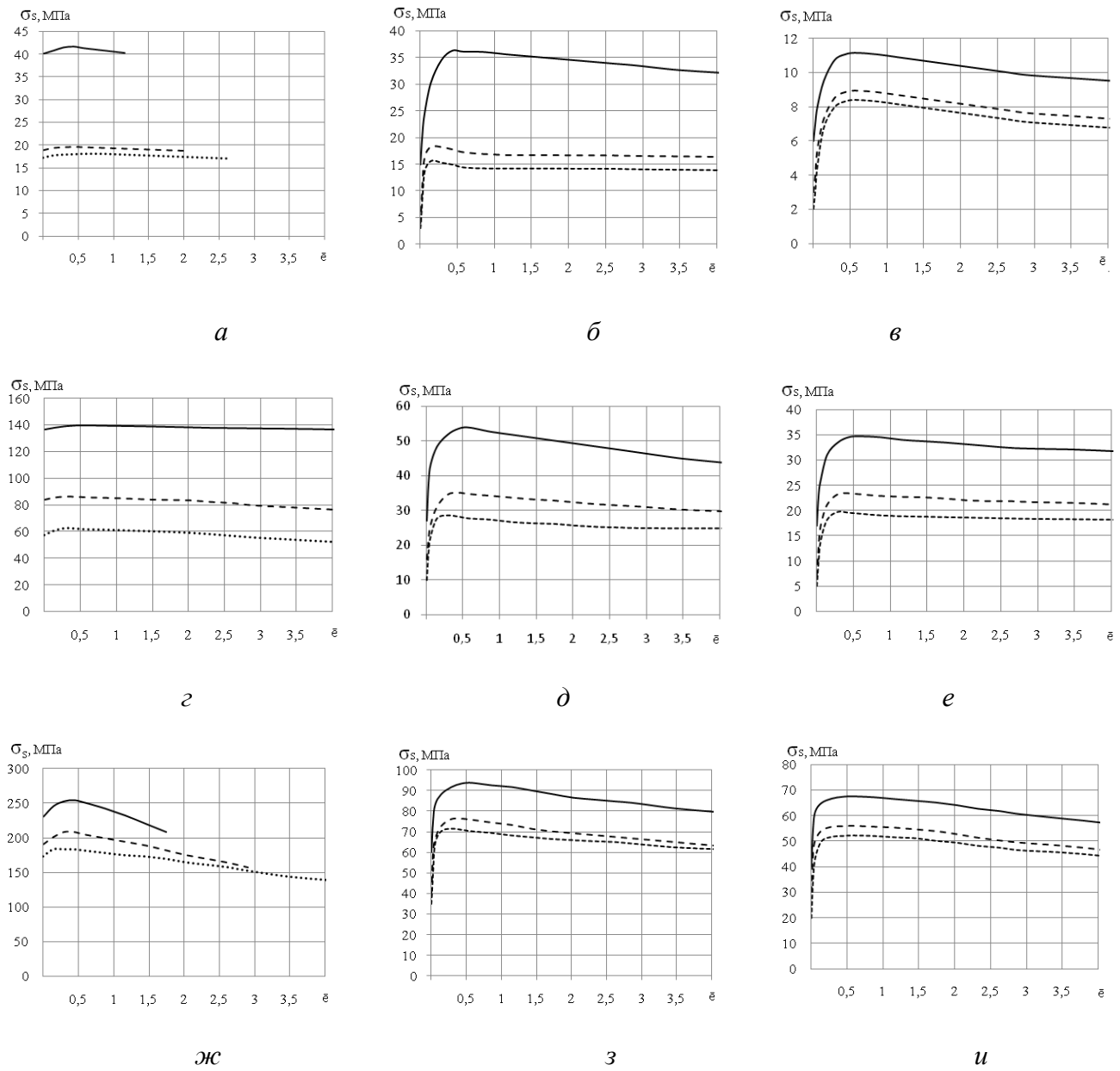


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления деформации σ_s для сплавов АМг6 (*а, г, ж*), АВ87 (*б, д, з*) и 8176 (*в, е, и*) от степени деформации $\bar{\varepsilon}$, скорости деформации ξ и температуры Т: *а, б, в* – 550; *г, д, е* – 450; *ж, з, и* – 320 ^{o} С

Для расчета усилий, действующих на валки $P_{вал}$ и матрицу $P_{матр}$, при совмещенной прокатке-прессовании металла на различных установках (табл. 2) принимали схему, показанную на рисунке 3.

Значения энергосиловых параметров для установки СПП-200 приведены в таблице 3. Видно, что для калибра с размерами в минимальном сечении 7х15 мм, даже при температуре 400 °С, усилие на валках не превышает 360 кН, а усилие на матрице – 350 кН, при этом с ростом вытяжки их значения увеличиваются.

Повышение температуры до 550 °С приводит к снижению усилия практически в 2-3 раза. Максимальные значения энергосиловых параметров получены для сплава АМг6, имеющего самое высокое сопротивление деформации. Тенденции изменения

энергосиловых параметров при совмещенной прокатке-прессовании с увеличением размеров калибра для сплавов АВ87 и 8176 на установках СЛИПП-2,5 и СЛИПП-4 остаются такими же, как и при обработке на установке СПП-200 и подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Таблица 2 – Данные для расчета и моделирования процесса совмещенной обработки

Величина	Наименование установки			
	СПП-200	СПП-400	СЛИПП-2,5	СЛИПП-4
Диаметр валка с выступом D_1, мм	214	385	462	428
Диаметр валка с канавкой D_2, мм	164	385	394	428
Минимальная высота калибра h, мм	7	9	10	19
Частота вращения валков ω, об/мин	5-14	0-5	0-6	0-15
Средний диаметр валков D_0, мм	189	385	428	428
Ширина калибра b, мм	15	22,5	22	42
Начальная высота заготовки h_0, мм	14	20	20	42
Начальная ширина заготовки b_0, мм	14	20	20	40
Высота зеркала матрицы $h_м$, мм	20	27,4	25	31
Диаметр пресс-изделия d, мм	7-9	9	9-12	9-15

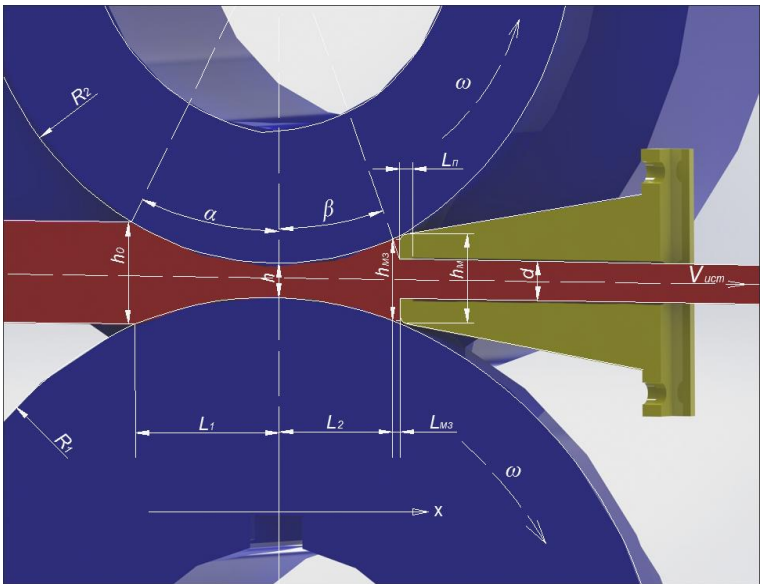


Рисунок 3 – Схема процесса совмещенной прокатки-прессования

Анализ энергосиловых параметров СПП при значительных степенях деформации (μ=14,3) и пониженной температуре заготовки ($T_з$=400 ^oC) показал, что они значительно ниже предельных усилий прессования на гидравлических прессах, используемых для обработки исследуемых сплавов. Поэтому энергозатраты на деформацию металла при совмещенной обработке значительно ниже, что еще раз подтверждает положительное влияние активных сил трения при прокатке-прессовании.

Таблица 3 – Расчетные значения энергосиловых параметров совмещенной обработки исследуемых сплавов на установке СПП-200

Сплав АМг6		$T_з$=400 °С			$T_з$=550 °С		
		μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3	μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3
ξ = 0,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	215,47	238,37	251,38	61,05	68,68	-
	$P_{матр}$, кН	143,25	187,85	239,85	40,59	54,13	-
ξ = 1,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	298,07	331,29	359,12	68,23	72,72	-
	$P_{матр}$, кН	198,16	261,08	342,64	45,36	57,31	-
Сплав АВ87		$T_з$=400 °С			$T_з$=550 °С		
		μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3	μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3
ξ = 0,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	93,37	101,00	112,23	53,87	56,56	58,36
	$P_{матр}$, кН	62,07	79,60	107,08	35,81	44,57	55,68
ξ = 1,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	118,51	133,32	139,16	64,64	68,68	71,82
	$P_{матр}$, кН	78,79	105,07	132,77	42,97	54,13	68,53
ξ = 10 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	179,56	197,96	210,98	125,69	137,36	148,14
	$P_{матр}$, кН	119,37	156,01	201,30	83,56	108,25	141,34
Сплав 8176		$T_з$=400 °С			$T_з$=550 °С		
		μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3	μ=4,4	μ=7,3	μ=14,3
ξ = 0,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	68,23	72,72	76,31	28,73	30,30	31,42
	$P_{матр}$, кН	45,36	57,31	72,81	19,10	23,88	29,98
ξ = 1,50 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	79,01	84,84	89,78	32,32	32,32	31,42
	$P_{матр}$, кН	52,52	66,86	85,66	21,49	25,47	29,98
ξ = 10 $с^{-1}$	$P_{вал}$, кН	122,10	133,32	139,16	39,50	40,40	40,40
	$P_{матр}$, кН	81,17	105,07	132,77	26,26	31,84	38,55

Проведенные расчеты показали, что исследуемые алюминиевые сплавы необходимо обрабатывать при повышенных температурах заготовки (до 550 °С) и сравнительно низких скоростях деформации (ξ = 0,5-1,5 $с^{-1}$), что приводит к снижению энергосиловых параметров процесса СПП. Температура обработки должна быть уточнена для каждого конкретного сплава, однако она должна находиться в таком диапазоне, который при заданной скорости деформации исключает получение температурных трещин на пресс-изделиях. С увеличением диаметра валков и, соответственно, размеров калибра энергосиловые параметры совмещенной обработки значительно возрастают, поэтому необходимо обеспечивать высокую прочность валкового и прессового инструмента.

В третьей главе изложены результаты компьютерного моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования для исследуемых сплавов.

Для изучения формоизменения и температурно-скоростных условий процесса СПП проведено компьютерное моделирование в программном комплексе Deform-3D для совмещенной обработки исследуемых сплавов на установках СПП-200 и СПП-400 (см. табл. 2). В качестве исходных данных для моделирования выбраны следующие: материал заготовки – алюминиевый сплав, материал валков и матрицы

– инструментальная сталь; материал заготовки изотропный; условия контактного взаимодействия заготовки и валков принимали по закону Зибеля с показателем трения при деформации металла в валках $\psi_в$ = 0.9 и на матрице $\psi_м$ = 0.3; трение на контакте валков и матрицы не учитывали; относительное обжатие при прокатке 50%; начальная температура заготовки $T_{заг}$ = 400–550 °С, осуществляется теплообмен с окружающей средой и инструментом; начальная температура матрицы $T_м$ и валков $T_в$ изменялась от 100 до 200 °С, при этом происходит теплообмен с окружающей средой и заготовкой; количество конечных элементов, на которые разбита заготовка, составило 32 тыс. шт.

Для анализа формоизменения и течения металла в процессе деформирования очаг деформации был разбит на три характерные зоны: прокатки, распрессовки и прессования. Картина течения металла в процессе деформации на установке СПП-200 показана на рисунке 4. Полученные модели позволяют установить, что в момент захвата валками заготовка изгибается в сторону валка с большим диаметром, а пройдя зону прокатки, начинает изгибаться в сторону валка с канавкой (меньшего диаметра), оковывая его. Далее заготовка достигает матрицы, и начинается процесс распрессовки металла в рабочей части калибра, образованной валками и матрицей, частично выдавливаясь в калибрующее отверстие матрицы. После полного заполнения калибра перед матрицей начинается процесс истечения металла с образованием пресс-изделия по форме и размерам калибрующего отверстия матрицы.

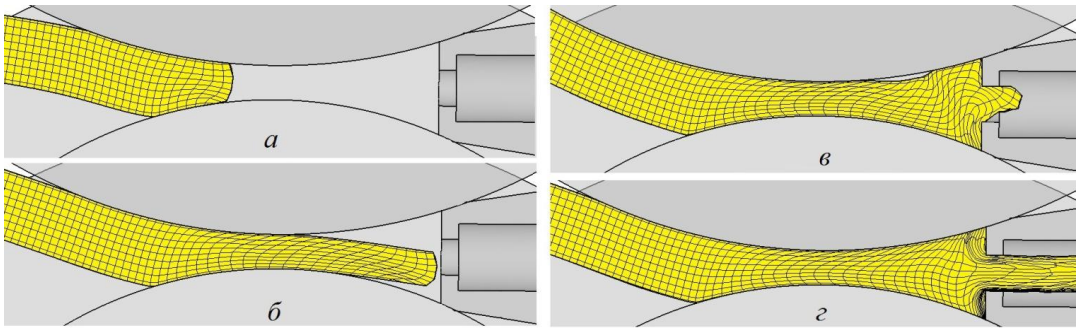
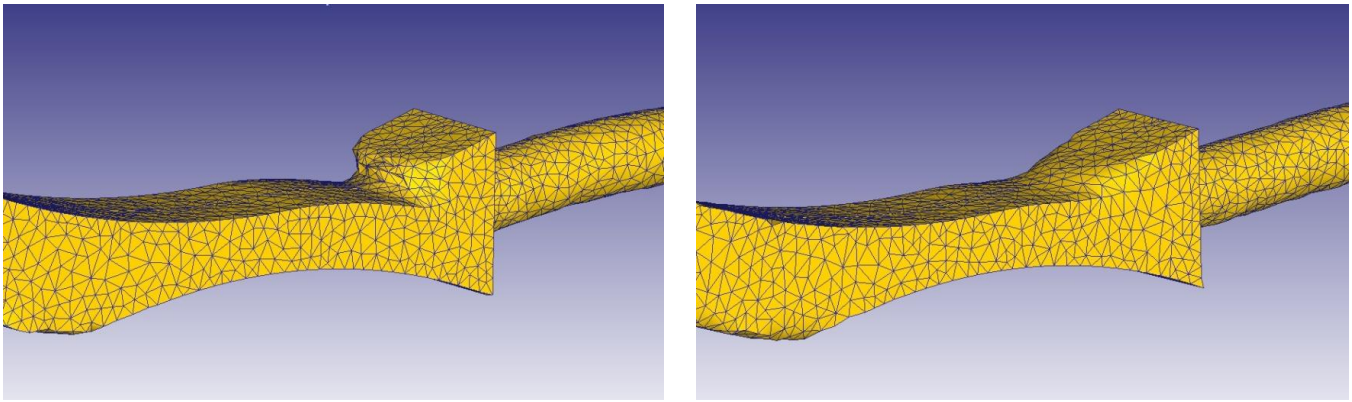


Рисунок 4 – Формоизменение металла в очаге деформации установки СПП-200:
а – стадия захвата металла, *б* – стадия прокатки, *в* – стадия распрессовки,
г – установившийся процесс прессования

Такая последовательность формоизменения подтверждается результатами экспериментальных исследований, проводимых ранее другими учеными. Особенностью формоизменения процесса СПП исследуемых сплавов является то, что при вытяжке μ = 3,7 и скорости деформации ξ_1 = 0,78 $с^{-1}$ процесс установившегося прессования проходит без полного заполнения очага деформации со стороны валка с большим диаметром. Увеличение вытяжки или скорости деформации приводит к уменьшению бесконтактной зоны или к её отсутствию. Данная закономерность ярко выражена на сплавах с высоким сопротивлением деформации. На рисунке 5 представлен общий вид пресс-остатков, полученных при модельном эксперименте на примере сплава АМг6.

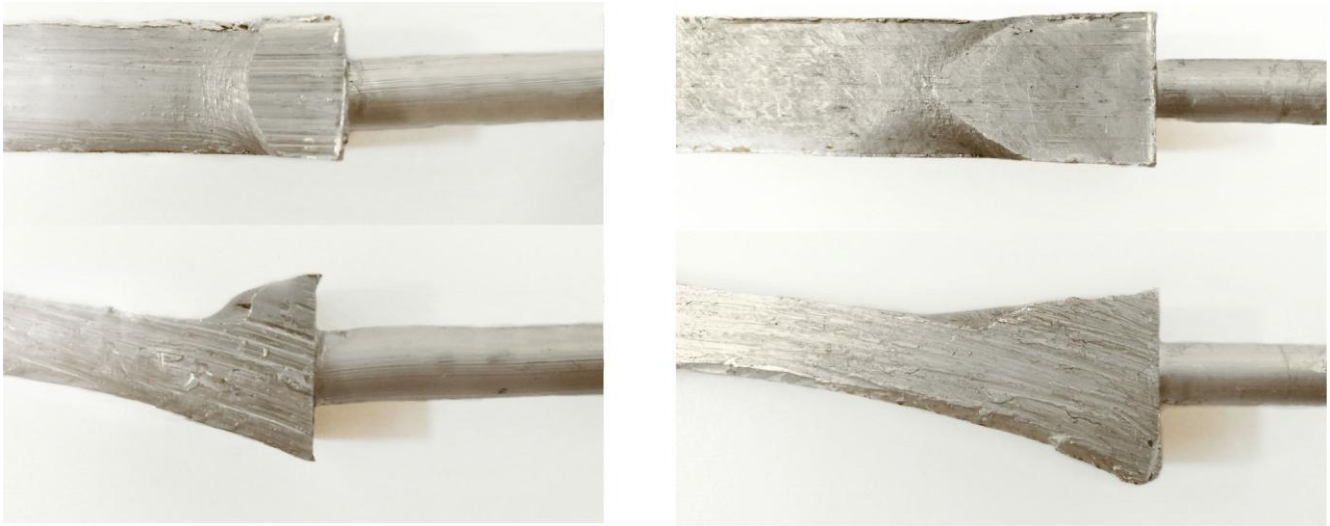
Для проверки адекватности модели для сплава АМг6 проведены лабораторные исследования на установке СПП-200. Эксперимент проводился при скорости деформации ξ_1 = 0,78 $с^{-1}$ и ξ_2 = 1,57 $с^{-1}$, начальная температура инструмента в процессе составляла 100 °С, температура заготовки $Т_з$=550 °С. Общий вид пресс-остатков, полученных в ходе эксперимента на лабораторной установке СПП-200, представлен на рисунке 6.

Увеличение скорости или степени деформации влияет на заполнение калибра валка металлом вследствие роста энергосиловых затрат на деформацию металла. На пресс-остатке ярко выражены зоны контакта поверхности валков с заготовкой и бесконтактная зона со стороны валка с большим диаметром. Таким образом, с помощью экспериментальных данных по формоизменению металла была проверена адекватность компьютерной модели на примере сплава АМг6.



а *б*

Рисунок 5 – Результаты моделирования процесса СПП для сплава АМг6 на установке СПП-200 с вытяжкой μ = 3,7: *а* - скорость деформации ξ_1 = 0,78 $с^{-1}$, *б* - скорость деформации ξ_2 = 1,57 $с^{-1}$



а *б*

Рисунок 6 – Форма пресс-остатков из сплава АМг6, полученных на лабораторной установке СПП-200 с вытяжкой μ = 3,7:
а - скорость деформации ξ_1 = 0,78 $с^{-1}$, *б* - скорость деформации ξ_2 = 1,57 $с^{-1}$

Важным фактором, влияющим на показатели и условия стабильного протекания процесса прокатки-прессования, является температура в очаге пластической деформации и прессуемого профиля.

На рисунке 7 показан характер изменения температуры в очаге деформации при обработке сплавов АМг6 и 8176. Установлено, что изменение температуры заготовки от 400 °С до 550 °С оказывает влияние на температуру профиля, выходящего из матрицы на выходе в пределах 20-40 °С в зависимости от сплава. Увеличение скорости деформации с $\xi_1 = 0{,}78$ с $^{-1}$ до $\xi_2 = 1{,}57$ с$^{-1}$ оказывает влияние на рост температуры на 100-150 °С. При увеличении вытяжки, температура металла растет в зоне распрессовки. Повышение вытяжки с $\mu = 3{,}7$ до $\mu = 11{,}8$ оказывает влияние в пределах 50 °С. Таким образом, можно подобрать такую скорость обработки исследуемого сплава, которая при необходимом коэффициенте вытяжки даёт возможность получить температуру пресс-изделия, не превышающую критического значения (начала образования температурных трещин).

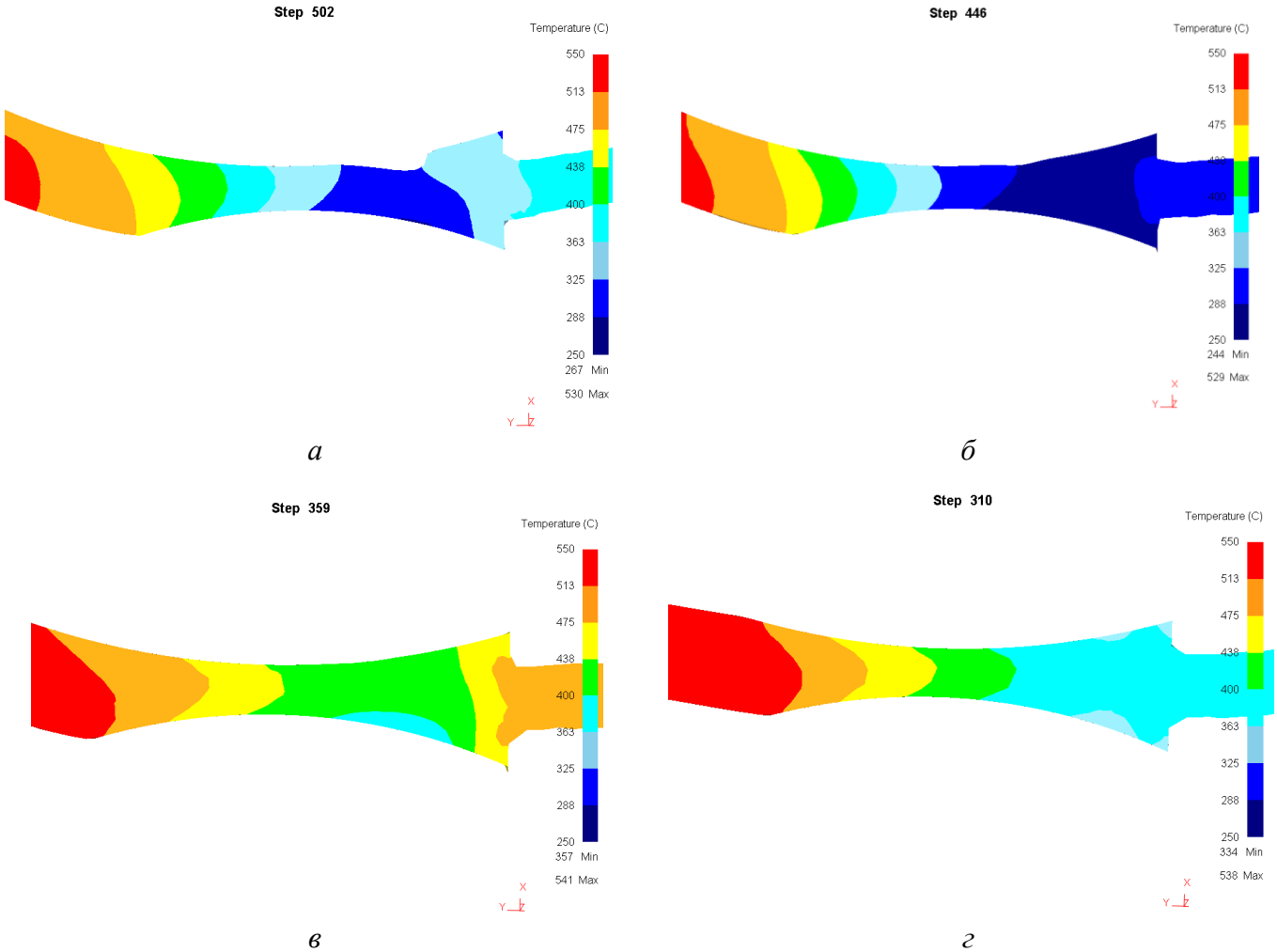


Рисунок 7 – Распределение температуры по сечению заготовки для сплавов АМг6 (*а, в*) и 8176 (*б, г*) при модельном эксперименте на установке СПП-200 с вытяжкой $\mu = 3{,}7$ для скорости деформации $\xi_1 = 0{,}78$ с$^{-1}$ (*а, б*) и $\xi_2 = 1{,}57$ с$^{-1}$ (*в, г*).

Установлено, что на всей протяженности очага деформации внутренние слои заготовки имеют более высокую температуру. До промежуточной зоны с максимальным обжатием заготовки и зоны распрессовки температура металла снижается, но в дальнейшем за счет большой вытяжки при прессовании происходит выделение деформационного тепла, и температура начинает расти. При этом распределение температуры при различных вытяжках отличается. Так как при вытяжке μ = 3,7 не происходит полного заполнения очага деформации, то и охлаждение заготовки со стороны бесконтактной зоны не происходит, следовательно, и температура заготовки со стороны валка с выступом немного выше, чем со стороны валка с вырезом. Далее в мертвых зонах металла перед матрицей наблюдается снижение температуры, а пруток на выходе из калибра матрицы разогревается равномерно.

Установлено, что изменение температуры заготовки от 400 °С до 550 °С оказывает влияние на температуру профиля, выходящего из матрицы на выходе в пределах 20-40 °С в зависимости от сплава. Увеличение скорости деформации с ξ_1 = 0,78 с $^{-1}$ до ξ_2 = 1,57 с$^{-1}$ оказывает влияние на рост температуры на 100-150 °С. При увеличении вытяжки, температура металла растет в зоне распрессовки. Повышение вытяжки с μ = 3,7 до μ = 11,8 оказывает влияние в пределах 50 °С. Таким образом, можно подобрать такую скорость обработки исследуемого сплава, которая при необходимом коэффициенте вытяжки даёт возможность получить температуру пресс-изделия, не превышающую критического значения (начала образования температурных трещин).

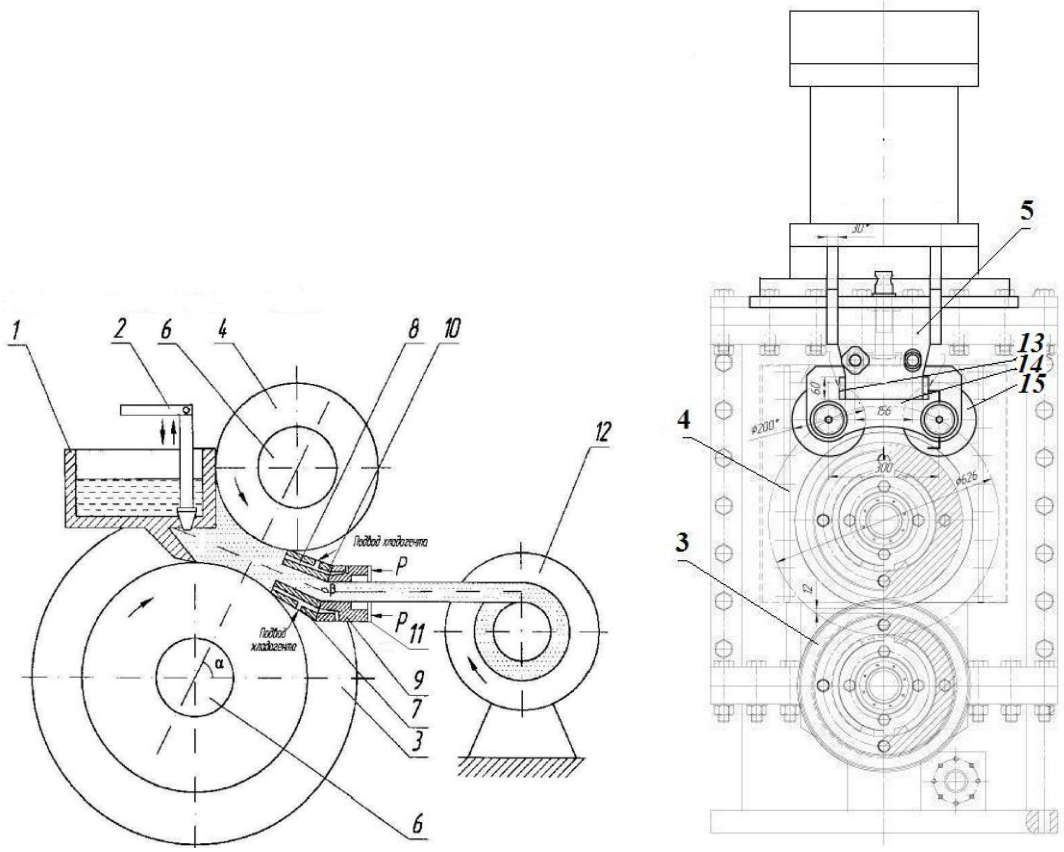
В результате моделирования установлено также, что значения интенсивности деформации имеют минимальные значения в середине заготовки и увеличиваются по направлению к поверхности заготовки. С увеличением скорости деформации эти значения больше со стороны валка с выступом. При отсутствии безконтактной зоны, например для сплава 8176, интенсивность накопленной деформации одинакова со стороны обоих валков. Скорость деформации по продольному сечению заготовки при скорости вращения валков 4 об/мин в зоне захвата заготовки имеет значение от 0,5 до 3 с$^{-1}$, а при скорости вращения валков 8 об/мин от 1,5 до 4 с$^{-1}$.

Проведенный анализ процесса совмещенной прокатки-прессования для различных алюминиевых сплавов по результатам моделирования позволил сделать следующие выводы. Во-первых, обработка малопластичных алюминиевых сплавов серии АМг6 и АВ87 с небольшими скоростями деформации на установке СПП с разными катающими диаметрами валков приводит к образованию бесконтактной зоны в очаге деформации со стороны валка с выступом. Это вызывает увеличение неравномерности деформации и температуры металла и, как следствие, возможность образования дефектов на поверхности пресс-изделия в виде трещин. Во-вторых, для проектирования технологии получения пресс-изделий на установках СПП необходимо учитывать особенности обрабатываемого сплава для корректировки температурно-скоростного режима работы установки. Так, например, для сплава АМг6 даже при незначительных изменениях скорости деформации температура металла увеличивается до критических значений, что

может вызвать появление температурных трещин на поверхности пресс-изделия. Поэтому для совмещенной обработки этого сплава рекомендуются следующие технологические параметры: скорость вращения валков 2,4 об/мин, температура заготовки $T_з$ = 450 °С, температура валков и матрицы 100-200°С

В четвёртой главе приведены технические и технологические решения, которые обеспечивают расчетную энергосиловую загрузку и стабильный процесс деформации при совмещенной обработке, и результаты экспериментальных исследований структуры и свойств опытных сплавов.

Для экспериментальных исследований использовали техническое решение по патенту РФ №138590 и ряд установок совмещенной обработки (см. табл. 2), общий вид одной из которых представлен на рисунке 8.



а *б*

Рисунок 8 – Общий вид установки совмещенной обработки СЛИПП-2,5 (*а*) и ее деформирующего узла с нажимным устройством (*б*):
1– печь–миксер; 2 – регулятор системы разливки; 3 – валок с вырезом; 4 – валок с выступом; 5 – станина; 6 – полости для охлаждения валков; 7 – форкамера; 8 – каналы для охлаждения форкамеры; 9 – матрица; 10 – полости для охлаждения матрицы; 11– гидравлический прижим; 12 – устройство приемки пресс–изделия,13 – нажимное устройство; 14 – пластины; 15 – ролики

На этих установках имеется возможность получения пресс-изделий, как методом совмещенной прокатки-прессования, так и методом бесслитковой прокатки-прессования (БПП).

Металлографические исследования микроструктуры металла полученных деформированных полуфабрикатов из всех сплавов проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m. Микрорентгеноспектральный анализ образцов осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа EVO 50 HVP (Carl Zeiss) с энергодисперсионным анализатором Inca ENERGY 350.

Исследование механических свойств металла всех сплавов проводили на испытательных машинах Walter + Bai AG LFM20 и LFM400 («Walter + Bai AG», Швейцария) методом статических испытаний на растяжение.

Термическую обработку деформированных полуфабрикатов из сплава 8176 проводили в электропечах LAC PK10-1000/12 и LAC PP20-540, а удельное электросопротивление для сплава 8176 измеряли с помощью омметра «ВИТОК».

Для сплава АМг6 важным параметром является скорость прессования, которая значительно влияет на качество получаемого профиля. Первые эксперименты на опытно-промышленной установке СПП-400 ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) показали, что прессование заготовки, нагретой до $T_з$ = 550 °С, при температуре валков $T_в$ = 200 °С и частоте вращения валков ω = 4,8 об/мин приводит к образованию температурных трещин по всему сечению прутка (рисунок 9, *а*).

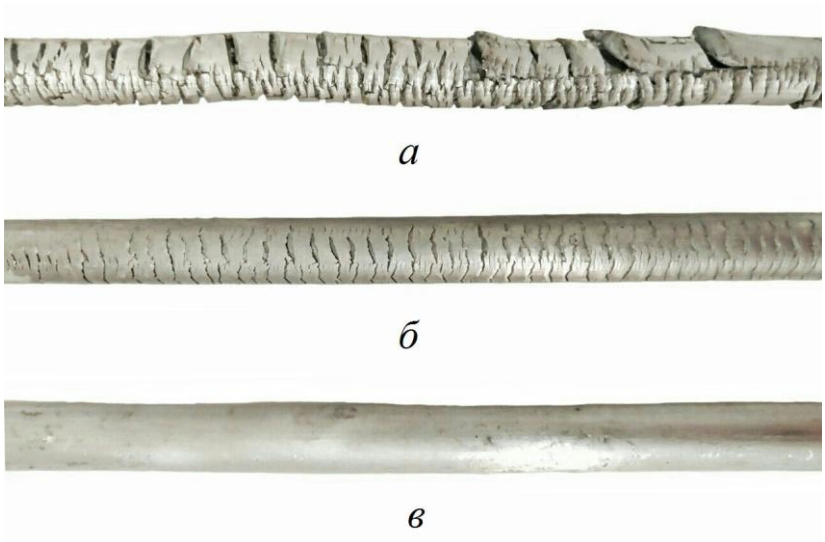


Рисунок 9 – Общий вид прутков диаметром 9 мм из сплава АМг6, полученных на установке СПП-400 при следующих параметрах: *а* - $T_з$ = 550 °С, ω = 4,8 об/мин; *б* - $T_з$ = 450 °С, ω = 4,8 об/мин; *в* - $T_з$=450 °С, ω = 2,4 об/мин

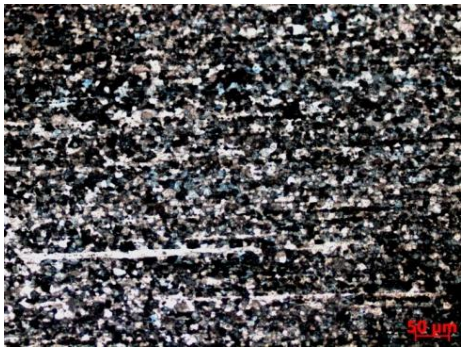
Так как снижение скорости вращения валков напрямую влияет на производительность установки, было принято решение снизить начальную температуру заготовки до $T_з$ = 450 °С, что привело к снижению количества температурных трещин, но не устранило их (рисунок 9, *б*). Последующее снижение температуры заготовки до $T_з$ = 400 °С привело к остановке электродвигателя в момент прессования профиля из-за превышения допустимого крутящего момента.

С использованием результатов моделирования была выбрана скорость вращения валков 2,4 об/мин и начальная температура заготовки $T_з$ = 450 °С, а

температура валков и матрицы составляла 200°С. При этих параметрах температура прутка, выходящего из отверстия матрицы, была равна $T_{пр}$ = 450 °С и соответствовала максимальной пластичности металла для данного сплава. При таких параметрах реализовали процесс прокатки-прессования без остановки электродвигателя установки и получили пресс-изделия без образования температурных трещин (рис. 9, *в*).

Результаты исследований структуры и свойств полуфабрикатов из сплава АМг6 показали, что микроструктура прутка (рис. 10) имеет волокнистое строение и вытянутые зёрна вдоль направления деформации с образованием частично рекристаллизованных зёрен, что больше всего выражено в прутках, полученных методом СПП.

а



б

Рисунок 10 – Характерная микроструктура исследуемых образцов деформированных полуфабрикатов диаметром 9 мм из сплава АМг6, полученных различными методами совмещенной обработки: *а* – БПП; *б* – СПП, съемка в поляризованном свете, ×500

Эти выводы подтверждаются результатами испытаний механических свойств металла (табл. 4), причем прочностные и пластические свойства прутков из сплава АМг6 соответствуют ГОСТ 21488-97, а значения временного сопротивления разрыву и относительного удлинения превышают регламентированные стандартом значения этих характеристик ($\sigma_В$ = 315 МПа, δ = 15 %).

Таблица 4 – Механические свойства прутков из сплава АМг6, полученных различными методами совмещенной обработки

Метод обработки	Временное сопротивление разрыву $\sigma_В$, МПа	Предел текучести $\sigma_Т$, МПа	Относительное удлинение δ, %
БПП	324	182	21,7
СПП	365	195	23,9

Таким образом, разработанная технология получения прутков из сплава АМг6 прошла промышленную апробацию на установке СПП-400 предприятия ООО «Завод современных материалов» (г. Красноярск) и позволяет изготавливать качественные деформированные полуфабрикаты по ГОСТ 7871-75.

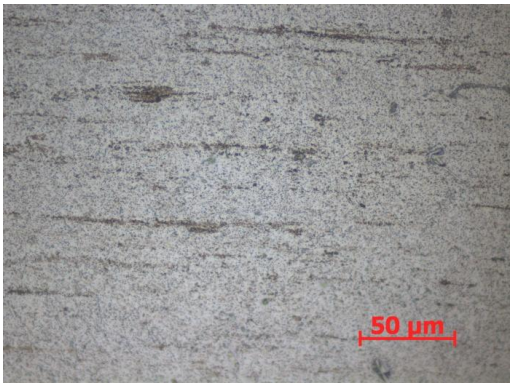
Для сплава АВ87 в результате реализации способа БПП на установке СПП-200 получили опытные партии полуфабрикатов различного диаметра, массив экспериментальных данных по их механическим свойствам (табл. 5) и энергосиловым параметрам процесса обработки. Путем применения методов планирования и обработки эксперимента вывели формулу для расчета временного сопротивления разрыву металла для опытного сплава, при этом адекватность расчетных и экспериментальных данных была проверена по критерию Фишера

$$\sigma_{\text{в}} = 157{,}875 - 4{,}125 \cdot \left(\frac{T-765}{15}\right) + 90 \cdot \left(\frac{\ln\mu - 2{,}335}{0{,}415}\right) - 3{,}625\left(\frac{\xi - 1{,}115}{0{,}375}\right). \qquad (2)$$

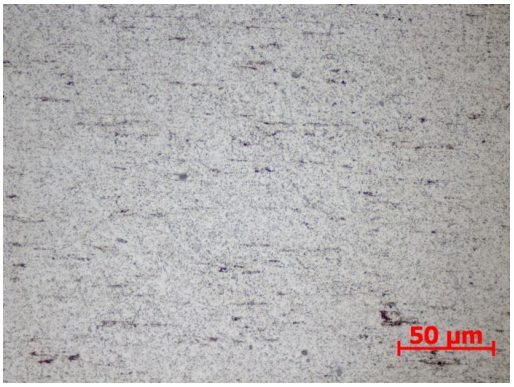
Таблица 5 – Механические свойства прутков из сплава АВ87 при различных режимах деформации

Частота вращения валков ω, об/мин	Свойства	Температура расплава					
		$T_р$ = 750 °С			$T_р$ = 780 °С		
		Диаметр 9 мм (μ=6,8)	Диаметр 7 мм (μ=8)	Диаметр 5 мм (μ=15,7)	Диаметр 9 мм (μ=6,8)	Диаметр 7 мм (μ=8)	Диаметр 5 мм (μ=15,7)
4	$\sigma_{\text{в}}$ (МПа)	156,7	167,5	173,1	146,3	166,9	170,2
	δ (%)	16,13	12,37	9,67	10,71	12,24	12,61
8	$\sigma_{\text{в}}$ (МПа)	151,2	158,1	167,5	141,6	154,0	156,4
	δ (%)	20,68	13,79	12,94	18,33	14,43	12,76

Микроструктура прутков из сплава АВ87 состоит из α-твердого раствора, в котором наблюдаются включения частиц выстроенных в направлении деформации в виде строчек (рис. 10).



а



б

Рисунок 10 – Микроструктура прутков из сплава АВ87 диаметром 9 мм, полученных БПП, при $T_р$ = 750 °С: *а* – ω=4 об/мин (ξ=0,78 $с^{-1}$); *б* - ω=8 об/мин (ξ=1,57 $с^{-1}$)

Уровень пластических свойств (см. табл. 5) позволяет производить смотку полученных длинномерных прутков из вторичного сплава АВ87 в бухты, что очень важно для последующего их использования при автоматизированной непрерывной подаче в расплав стали.

Для сплава 8176 на первом этапе исследований для изучения влияния железа и режимов литья на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов, а также на технологические параметры совмещенной обработки использовали заготовки различного химического состава. При этом варьировали содержание железа 0,45-0,55 % (1 и 4 образцы), 0,65-0,75 % (2 и 5 образцы) 0,85-0,95 % (3 и 6 образцы), а также температуру плавки 750 ^{o}C (1-3 образцы) и 780 ^{o}C (4-6 образцы). В таблице 6 показано изменение механических свойств деформированных полуфабрикатов и их удельного электросопротивления ρ в зависимости от этих параметров.

Таблица 6 – Механические и электрофизические свойства деформированных полуфабрикатов различного диаметра из сплава 8176

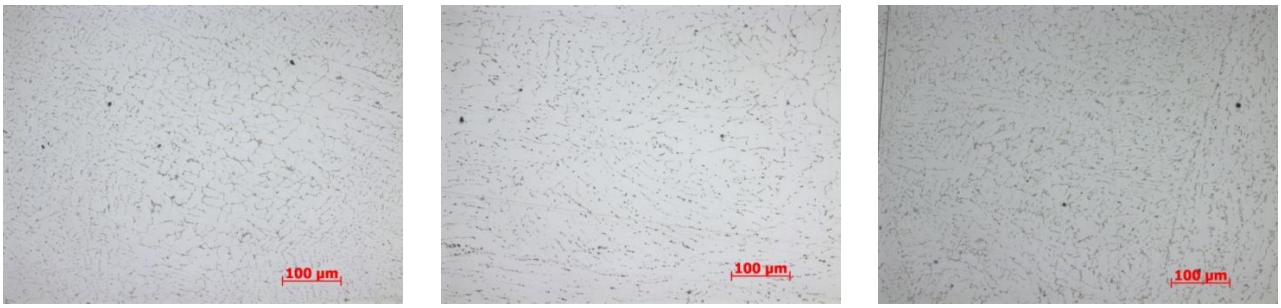
Номер образца	Вид полуфабриката											
	пруток диаметром 9 мм			проволока диаметром 4,5 мм			проволока диаметром 3,2 мм			проволока диаметром 2 мм		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ρ , Ом·мм^2/м	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ρ , Ом·мм^2/м	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ρ , Ом·мм^2/м	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ρ , Ом·мм^2/м
1	138	18,4	0,02907	190	3,8	0,02914	208	3,5	0,02963	225	2,1	0,02970
2	141	17,8	0,02901	195	3,5	0,02903	212	2,5	0,02905	226	2,0	0,02925
3	145	16,5	0,02884	196	3,3	0,02888	218	2,1	0,02889	227	1,9	0,02892
4	141	20,8	0,02923	204	3,3	0,02944	222	3,1	0,02953	235	3,0	0,02985
5	150	18,6	0,02945	209	2,9	0,02954	230	2,6	0,02971	246	2,4	0,02980
6	154	13,7	0,03000	211	3,0	0,03002	233	2,2	0,03027	253	2,1	0,03052

Анализ полученных результатов показывает, что временное сопротивление разрыву металла $\sigma_в$ для прутков из сплава 8176 находится в диапазоне значений 138–154 МПа. После волочения проволоки диаметром до 2 мм прочностные характеристики увеличиваются и лежат в интервале 225–253 МПа. Относительное удлинение δ при этом составляет для прутков 14–20 %, а для проволоки конечного диаметра не превышает 3%.

Металлографический анализ прутков, полученных методом БПП (рис. 11), показал, что микроструктура всех образцов состоит из α-твердого раствора и дисперсных частиц железосодержащих фаз.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что повышение концентрации железа приводит к увеличению железосодержащих фаз, которые обеспечивают упрочнение сплавов, увеличение удельного электросопротивления, но при этом приводят к понижению относительного удлинения. Полученные полуфабрикаты не соответствует требованиям по

относительному удлинению, предъявляемым DIN EN 1715–2:2008–07 для состояния Н24 (δ_{min} = 25 %), поэтому для достижения требуемых свойств были подобраны режимы и осуществлен рекристаллизационный отжиг при температуре 550±5 °С и времени выдержки 1- 1,5 часа.



а *б* *в*

Рисунок 11 – Микроструктура прутков из сплава 8176, полученных методом БПП, в зависимости от содержания Fe, ×200:
а – 0,45-55%; *б* – 0,65-0,75%; *в* – 0,85-0,95%

Отжиг позволил достичь требуемого разупрочнения в образцах сплава 8176 с концентрацией железа до 0,75 % , при этом прутки, полученные методом БПП, имели временное сопротивление порядка 80 МПа, а относительное удлинение возросло до 44 %. Удельное электросопротивление ρ оказалось равным 0,28312 Ом·мм^2/м.

Таким образом, проведение отжига при температуре 550±5 °С в течение 1–1,5 часов образцов, содержащих до 0,75 % железа, дало возможность получить пластические свойства металла и значения удельного электросопротивления требуемого уровня в соответствии с DIN EN 1715–2:2008–07.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведен анализ конструкций оборудования и методик по определению реологических свойств алюминиевых сплавов, предложено техническое решение, защищенное патентом РФ № 130708, на основе которого изготовлена и применена для исследований установка на кручение.
2. Изучены реологические свойства сплавов АМг6, АВ87, 8176, получены уравнения для определения сопротивления деформации исследуемых сплавов в зависимости от температуры, скорости и степени деформации для условий горячего прессования.
3. С использованием реологических характеристик для исследуемых сплавов создана компьютерная модель и проведено 3D моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования для анализа формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла при различных температурно-скоростных параметрах процесса.

4. В результате моделирования установлено, что для сплавов АВ87 и 8176 изменение скорости деформации, в отличие от сплава АМг6, незначительно влияет на технологические параметры обработки, а технологический режим регламентируется только возможностями установки. Для получения деформированных полуфабрикатов диаметром 9 мм из сплава АМг6 методом совмещенной прокатки-прессования в промышленных условиях на установке СПП-400 с вытяжкой μ = 9,6 рекомендован следующий режим обработки: температура нагрева заготовки 450 °С; температура нагрева инструмента 200 °С; скорость вращения валков 2,4 об/мин.

5. Разработаны новые технические решения по конструкциям оборудования для совмещенной прокатки-прессования, защищенные патентами №138590 и №156613, которые позволяют расширить технологические возможности процесса и повысить его реализуемость.

6. Проведены экспериментальные исследования по получению опытных партий длинномерных деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов методом совмещенной обработки в лабораторных и промышленных условиях и изучены их структура и свойства.

7. Предложенная на основании результатов моделирования технология совмещенной обработки для сплава АМг6 (системы Al-Mg) на установке СПП-400 с вытяжкой μ = 9,6 прошла промышленную апробацию на предприятии ООО «Завод современных материалов» г. Красноярск и позволяет получать качественные деформированные полуфабрикаты, свойства которых отвечают требованиям ГОСТ 7871-75.

8. Полученные в результате экспериментальных исследований деформированные полуфабрикаты диаметром 9 мм из сплава АВ87 имеют относительно высокие пластические свойства, которые позволяют использовать их в качестве прутка-раскислителя в сталях, осуществляя подачу из смотанной бухты.

9. Совмещенную обработку для алюминиевого сплава 8176 (системы Al-Fe) целесообразно производить методом бесслитковой прокатки-прессования с последующим отжигом при температуре 550±5 °С в течение 1–1,5 часов, что позволяет получать деформированные полуфабрикаты, которые в отожженном состоянии соответствуют требованиям, предъявляемым международными стандартами как по химическому составу, так и по механическим и электрофизическим свойствам.

10. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и использовались при проектировании промышленной установки совмещенной обработки СЛИПП-4 на Иркутском алюминиевом заводе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Samchuk, A. P.** Determining power-energy parameters of combined rolling-extrusion process for low-plastic aluminium alloys / S. B. Sidelnikov, R. I. Galiev, V. M. Bespalov // Non-ferrous Metals. – 2018. – № 1. – С. 30 – 36. **(база цитирования Scopus).**

2. **Самчук, А. П.** Сравнительный анализ свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов 8176 и 8030, полученных совмещенными способами обработки / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Е. С. Лопатина, **А. П. Самчук** // Производство проката. – 2017. – С. 30 – 37. **(издание, рекомендуемое ВАК).**

3. **Самчук, А. П.** Разработка новых устройств и способов совмещенной обработки для получения электротехнической катанки из алюминиевых сплавов системы Al-Zr / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, В. М. Беспалов, **А. П. Самчук** [и др.] // Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – № 5. – С. 626 – 635. **(издание, рекомендуемое ВАК).**

4. **Самчук, А. П.** Экспериментальные исследования процесса совмещенной обработки для получения катанки из сплавов системы Al-Fe / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Т. Н. Дроздова, **А. П. Самчук** [и др.] // Производство проката. – 2015. – № 9. – С. 40 – 46. **(издание, рекомендуемое ВАК).**

5. **Самчук, А. П.** Исследование реологических свойств электротехнической катанки из сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами, полученной методами непрерывного литья и обработки давлением / С. Б. Сидельников, **А. П. Самчук,** А. С. Сидельников, Д. С. Ворошилов [и др.] // Вестник ЮУрГУ «Металлургия». – 2015. – № 2. – С. 89 – 95. **(издание, рекомендуемое ВАК).**

6. **Самчук, А. П.** Совершенствование конструкций установок совмещенной обработки алюминия и его сплавов / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, С. В. Солдатов, **А. П. Самчук** [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. научных трудов / под ред. Корчунова А. Г. – Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – С. 7 – 12.

7. **Самчук, А. П.** Исследовательский комплекс для определения реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов [Электронный ресурс] / А. П. Самчук // Молодежь и наука: Проспект Свободный Красноярск. – 2013. Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-023.pdf.

8. **Самчук, А. П.** Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из новых алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] / **А. П. Самчук** // Молодежь и наука: Проспект Свободный Красноярск. – 2014. Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s10/s10_011.pdf.

9 **Самчук, А. П.** Разработка технологии производства катанки, полученной совмещенными методами обработки из алюминиевых сплавов серии 8XXX, и

исследование её структуры и свойств / А. Л. Трифоненков, С. Б. Сидельников, **А. П. Самчук** [и др.] // Сборник докладов VIII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск: ООО «Версо». – 2016. – С. 298 – 299.

10. **Самчук, А. П.** Разработка и исследование процесса получения пресс-изделий из малопластичных алюминиевых сплавов методами совмещенной обработки / Р. И. Галиев, С. Б. Сидельников, **А. П. Самчук** [и др.] // Сборник докладов VIII Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск: ООО «Версо». – 2016. – С. 268 – 269.

11. **Самчук, А. П.** Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из малопластичных алюминиевых сплавов, полученных методами совмещенной обработки / **А. П. Самчук** // Magnitogorsk Rolling Practice 2018, III молодежная научно-практическая конференция. – Магнитогорск. – 2018. – С. 7 – 9.

12. Пат. 130708 Российская Федерация, МПК G01N3/22. Установка для испытаний на скручивание / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, Н. А. Грищенко, **А. П. Самчук** [и др.]; опубл. 27.07.2013.

13. Пат. 138590 Российская Федерация, МПК B21C23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, В. М. Беспалов, Н. Н. Довженко, С. В. Беляев, **А. П. Самчук.** [и др.]; опубл. 20.03.2014.

14. Пат. 156613 Российская Федерация, МПК B21C23/00. Устройство для непрерывной прокатки-прессования полых пресс-изделий из цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, **А. П. Самчук.** [и др.]; опубл. 10.11.2015.

Подписано в печать ___.___.2018. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тир 100 экз. Заказ ____
Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; http://lib.sfu-kras.ru