

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

*Посвящается 90-летию Сибирского  
государственного индустриального университета*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
«Металлургия – 2019»**

*23 – 24 октября 2019 г.*

*Труды  
XXI Международной научно-практической конференции  
Часть 1*

**Новокузнецк  
2019**

УДК 669(06)+658.012.056(06)  
М 540

Редакционная коллегия  
академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,  
д.т.н., профессор М.В. Темлянцев, д.т.н., профессор Г.В. Галевский,  
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский,  
к.т.н., доцент С.Г. Коротков

М 540      Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXI Международной  
научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. Е.В. Протопопова;  
Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 404 с. : ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и  
технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения,  
рециклинга и экологии в металлургии.

#### **ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Администрация Кемеровской области  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»  
АО «Русал Новокузнецк»  
АО «Кузнецкие ферросплавы»  
ОАО «Черметинформация»  
Издательство Сибирского отделения РАН  
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»  
Журнал «Вестник СибГИУ»  
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»  
АО «Кузбасский технопарк»  
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук  
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный  
индустриальный университет, 2019

## ДЕФОРМАЦИЯ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И СВОЙСТВА ПОРШНЕВЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Прудников В.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, a.prudnikov@mail.ru*

**Аннотация.** Исследована серия поршневых заэвтектических силуминов на основе Al – (15÷20) % Si, легированных медью, магнием, никелем, хромом. Определены механические свойства и ТКЛР опытных сплавов в литом состоянии и послековки. Определен оптимальный режим термической обработки деформированных силуминов: закалка со ступенчатого нагрева и старение, который позволяет повысить прочность поковок до 370-470 МПа. При этом показатели пластичности остаются на высоком уровне, а средний ТКЛР сплавов составляет  $(18,0\div 19,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в интервале 50÷200 °С.

**Ключевые слова:** заэвтектический силумин, структура,ковка, механические свойства, термическая обработка, температурный коэффициент линейного расширения

## DEFORMATION, HEAT TREATMENT AND PROPERTIES OF PISTON HYPEREUTECTIC SILUMINS

Afanas`ev V.K., Prudnikov A.N., Prudnikov V.A.

*Siberian State Industrial University  
Novokuznetsk, Russia, a.prudnikov@mail.ru*

**Abstract.** A series of piston hypereutectic silumin based on Al - (15÷20) % Si, alloyed with copper, magnesium, nickel, chromium is investigated. The mechanical properties and thermal expansion coefficient of the experimental alloys in the cast state and after forging are determined. The optimal mode of heat treatment of deformed silumin is determined: quenching from step heating and aging, which allows increasing the strength of forgings up to 370-470 MPa. Moreover, the plasticity indicators remain at a high level, and the average thermal expansion coefficient of the alloys is  $(18.0\div 19.2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  in the range of 50 ÷ 200 °C.

**keywords:** hypereutectic silumin, structure, forging, heat treatment, tensile strength, hardness, temperature coefficient of linear expansion.

### **Введение**

Анализ условий работы поршней современных тяжелонагруженных двигателей [1-3] показывает, что в процессе работы они воспринимают значительные динамические нагрузки, меняющиеся в течение одного цикла по знаку и направлению. Причем давление газов на поршень может достигать 800 МПа. Еще одной особенностью условий работы поршня является высокая температура продуктов сгорания топлива (~ до 2000°С). Это обуславливает разогрев днища поршня при определенных режимах работы двигателя до 350-400 °С. С учетом условий работы поршней и предъявляемых жестких требований к поршневым сплавам заэвтектические легированные силумины являются в настоящее время одним из самых перспективных материалов для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания. Это определяется благоприятным сочетанием малого удельного веса, низкого температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с хорошими механическими и технологическими свойствами. Однако присутствие в структуре заэвтектических силуминов крупных кристаллов первичного кремния снижает их пластичность и не позволяет производить поршни обработкой давлением в промышленных условиях [2-5]. Кроме того, они отрицательно вли-

яют на динамическую и статическую прочность поршней и не позволяют иметь высокие значения усталостной прочности, характерной для деформируемых сплавов. Для обеспечения необходимого комплекса физико-механических характеристик заготовок из поршневых сплавов обязательно применяется окончательная термическая обработка [3,6]. Поэтому изучение склонности опытных высококремнистых деформируемых силуминов к упрочняющей термической обработке и к изменению ТКЛР представляет практический интерес и является целью настоящей работы.

#### **Материалы и методика исследований**

Изготовлена серия опытных слитков из заэвтектических силуминов на основе Al – (15÷20) % Si, легированных медью, магнием, никелем, хром и другими элементами. С целью обеспечения хорошей деформируемости и высокого комплекса механических свойств сплавы модифицировали фосфор- и водородсодержащими реагентами [2,3]. Диаметр опытных слитков составлял 190 мм, высота – 500-550 мм, вес – 32-40 кг. Химический состав сплавов приведен в таблице 1.

Приготовление опытных сплавов проводили в промышленной индукционной печи в графитовом тигле емкостью 40 кг. Сплавы готовили на алюминии А7 (ГОСТ 11063), кремнии Кр0 (ГОСТ 2163). В качестве легирующих добавок использовали технически чистые металлы и лигатуры. Наводороживание расплава проводили с помощью влажных асбестовых тампонов при температуре 700-760 °С. Фосфор вводили в сплавы в виде фосфористой меди МФ-1, содержащей 10 % фосфора [3].

Технологический процесс приготовления сплавов включал следующие основные операции: загрузка в печь и расплавление расчетного количества алюминия, легирование, наводороживание, модифицирование, отстаивание расплава, снятие шлака, заливка. Расплав заливали в стальную цилиндрическую изложницу (кокиль), окрашенную огнеупорной краской. Температура заливки сплавов составляла 700-730 °С (для сплавов на основе Al-15-18 % Si) и 730-750 °С (для сплавов на основе Al-20 % Si).

Таблица 1 – Химический состав опытных поршневых заэвтектических силуминов

№ сплава	Компоненты сплавов, вес. %									
	Si	Cu	Mg	Ni	Mn	Cr	Ti	P	H	Al
1	15	3	0,2	-	-	-	-	0,01	0,00008	ост.
2	15	3	0,2	1,0	-	-	-	0,01	0,0001	ост.
3	15	5	1,1	1,0	-	-	-	0,01	0,0003	ост.
4	18	4	0,6	-	-	-	-	0,02	0,0003	ост.
5	18	4	0,6	1,0	-	-	-	0,02	0,0006	ост.
6	20	5	1,1	-	-	-	-	0,03	0,0006	ост.
8	20	1	0,4	-	0,8	0,3	0,1	0,01	0,00008	ост.

После механической обработки (удаление литой поверхности, резка на заготовки) слитки подвергали горячей пластической деформации (свободная ковка). Суммарная степень деформации составляла  $\epsilon = 94\%$ , а общий коэффициент уковки –  $K_{\text{общ}} = 28$ . Ковку заготовок проводили на пневматическом кузнечном молоте МВ 412 с массой бойка 160 кг и энергией удара не менее 2,5 кДж. Перед ковкой заготовки подвергали отжигу для получения в них равновесной структуры. Температура отжига и время выдержки подобраны экспериментально и составили 450-470 °С и 1,5-3 ч. В процессековки проводили промежуточные отжиги при температуре 450±10°С в течение 0,5-1 ч [7-9].

Термическую обработку поковок проводили в печах сопротивления СНОЛ 2.2, 5.2/12,5-II и электрических сушильных шкафах СНОЛ 3,5.3,5.3,5/3,5-II2. Для металлографического анализа слитков и поковок использовали оптический микроскоп OLYMPUS GX-51F.

Изучение микроструктуры слитков проводили на микрошлифах, приготовленных из поперечных темплетов, вырезанных на равной высоте от донной части слитка. Истинный и средний ТКЛР сплавов определяли с помощью высокотемпературного дифференциального dilatометра. Погрешность определения ТКЛР составляла  $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

### **Результаты и обсуждение**

Микроструктура опытного слитка из легированного заэвтектического силумина на основе Al-18 % Si приведена на рисунке 1.

Установлено, что микроструктура сплавов в литом состоянии неоднородна по сечению слитка. По его поперечному сечению можно выделить три характерные зоны:

– поверхностную – представляет собой грубокристаллический ободок шириной 3÷5 мм с наибольшей объемной долей КПК;

– промежуточную – состоящую из эвтектики игольчатого типа, участков  $\alpha$ -твердого раствора и кристаллов первичного кремния. Также хорошо видны темные выделения фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и светлые округлые –  $\text{CuAl}_2$ ;

– центральную – микроструктура которой состоит из двойной и более сложных эвтектик, участков  $\alpha$ -твердого раствора сложного состава и кристаллов первичного кремния (КПК). Причем объемная доля КПК в центральной зоне слитка значительно меньше, чем в промежуточной.

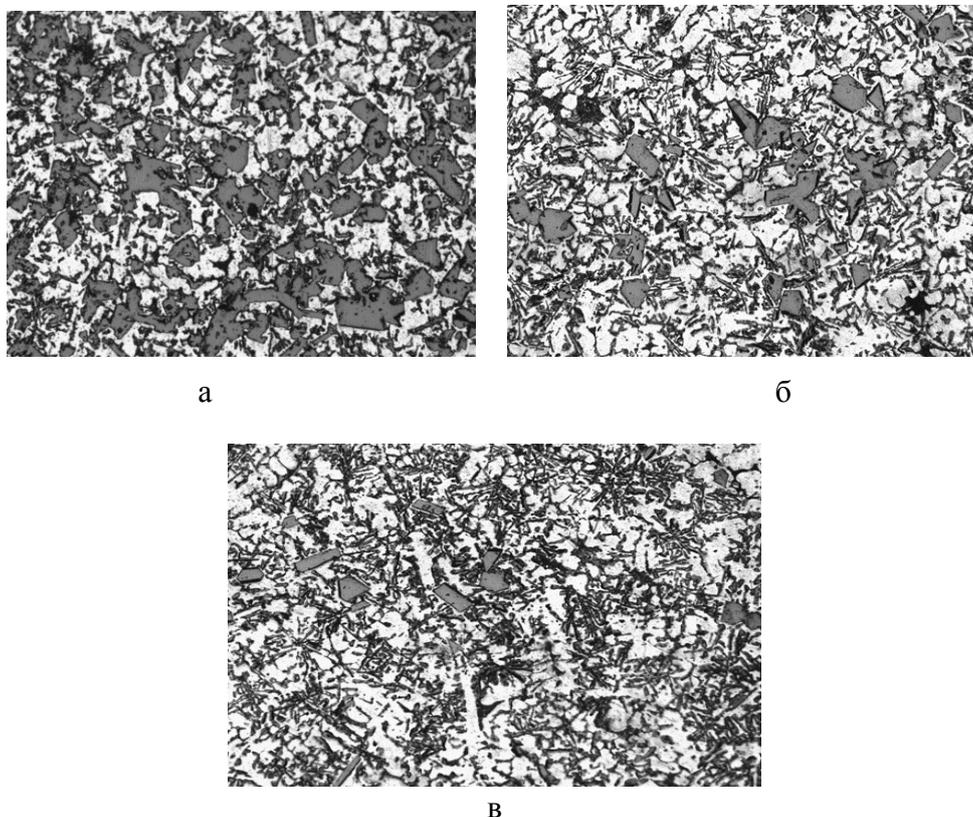


Рисунок 1 – Микроструктура слитка из опытного легированного силумина Al-18 % Si-4 % Cu-0,6 % Mg: а – поверхностная; б – промежуточная; в – центральная зоны;  $\times 100$

В таблице 2 приведены механические свойства и температурный коэффициент линейного расширения сплавов в литом состоянии. Видно, что несмотря на структурные отличия краевой (промежуточная зона) и центральной частей слитков, твердость их различается незначительно и составляет 840-1020 и 813-1006 МПа соответственно. Временное сопротивление разрыву слитков из опытных заэвтектических силуминов находится в пределах 80-153 МПа. Их среднее значение коэффициента линейного расширения, определяемого в интервале 50-200 °С, составляет  $(17,2 \div 19,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а в интервале 200-450 °С –  $(17,7 \div 21,4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  соответственно.

Перед ковкой заготовки подвергали отжигу при 450-470 °С в течение 1,5-3 ч. При от-

жиге происходит частичное устранение неоднородности структуры и состава сплавов посредством диффузии, коагуляция кремнистых выделений. При этом в значительной степени уменьшается напряженность кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора алюминия, что позволяет облегчить процесс деформирования металла.

Таблица 2 – Физико-механические свойства слитков из легированных заэвтектических силуминов

№ сплава	Твердость, НВ, МПа		$\sigma_B$ , МПа	Средний ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур, °С	
	край	центр		50-200	200-450
1	873	853	153	19,1	20,8
2	840	813	148	18,9	19,7
3	1020	1006	125	19,2	20,6
4	986	928	138	19,5	21,4
5	980	876	124	16,7	17,7
6	943	941	86	18,7	19,9
7	958	950	80	19,0	20,5

В структуре поковок присутствуют раздробленные мелкокристаллические равномерно распределенные кристаллы первичного кремния и эвтектика, имеющая зернистое строение. Под действием горячей деформации и отжигов происходит коагуляция и сфероидизация эвтектических частиц кремния и других фаз.

Механические характеристики и средний ТКЛР сплавов в деформированном состоянии приведены в таблице 3. Видно, что временное сопротивление разрыву деформированных заготовок составляет 227-306 МПа в зависимости от состава заэвтектических силуминов. Кроме того, горячая ковка сплавов формирует более мелкозернистую микроструктуру заготовок со сфероидизированными выделениями эвтектического кремния и других фаз. Микроструктура поковок из силумина Al-18 % Si-4 % Cu-0,6 % Mg приведена на рисунке 2. Такая структура обеспечивает довольно высокую пластичность поковок по сравнению с литым состоянием сплавов (относительное удлинение  $\delta = 5,7 \div 7,5$  %; относительное сужение  $\Psi = 10,3 \div 14,2$  %).

Термическая обработка поковок из легированных заэвтектических силуминов включала закалку и старение. Упрочнение в этом случае достигается за счет фиксации максимально пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора алюминия при закалке и его распада при последующем старении, обусловленного уменьшением растворимости легирующих компонентов с понижением температуры.

Таблица 3 – Физико-механические свойства сплавов в деформированном состоянии (ковка,  $\varepsilon = 94$  %)

№ сплава	Механические свойства			Средний ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур, °С	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	50-200	200-450
1	245	7,5	14,2	19,8	20,9
2	227	5,7	13,1	19,8	19,8
4	306	7,2	13,4	18,6	20,8
5	291	5,8	10,0	19,3	19,4

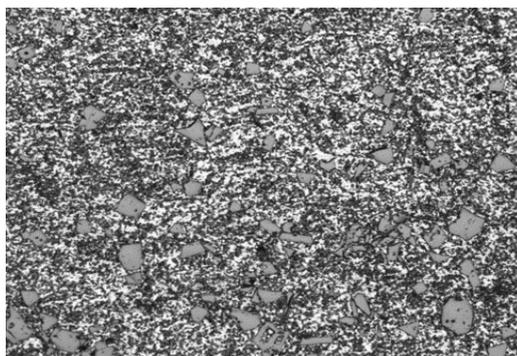


Рисунок 2 – Микроструктура поковки из опытного заэвтектического силумина Al-18 % Si-4 % Cu-0,6 Mg;  $\times 100$

Известно, что параметры закалки (температура нагрева и время выдержки) зависят от природы сплавов, их фазового состава. Анализ диаграммы состояния системы Al-Si-Cu-Mg, к которой относятся данные сплавы, показывает, что они имеют сложный фазовый состав. В равновесии с алюминиевым твердым раствором могут находиться семь фаз: Si,  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ),  $\beta$  ( $\text{Al}_2\text{Mg}_3$ ) или ( $\text{Al}_8\text{Mg}_5$ ),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), T ( $\text{Al}_6\text{CuMg}$ ), W ( $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ ) [4]. Основными упрочнителями являются фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) и частично W ( $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ ). Сложный фазовый состав сплавов обуславливает возможность протекания большого количества невариантных реакций в широком диапазоне температур 444-577 °C [10] и, следовательно, возможно образование сложных легкоплавких эвтектик, температура плавления которых определяет режимы нагрева под закалку. Такая особенность сплавов обуславливает повышенную склонность сплавов к пережогу. Чтобы обеспечить полноту растворения легирующих элементов и не допустить возможности пережога, рекомендуется применять ступенчатый нагрев под закалку. Необходимость проведения такого нагрева для данных сплавов подтверждается результатами экспериментов по влиянию температуры нагрева под закалку в холодную воду и времени выдержки на механические свойства сплавов (режим старения – 150 °C, 5 ч), приведенными в таблице 4 для состава сплава № 4 (см. таблица 1).

Анализ данных таблицы 4 показывает, что удовлетворительное сочетание прочности и пластичности достигается после закалки по режимам 2 и 3, предусматривающим ступенчатый нагрев под закалку при температурах  $480 \pm 10$  °C (первая ступень) и 490 и  $500 \pm 10$  °C (вторая ступень) с выдержкой при этих температурах 0,5-1 ч и последующим старением. После проведения указанных режимов термической обработки временное сопротивление поволоков составляет 450-460 МПа, относительное удлинение – 4 %, относительное сужение 5,8-8,3 %.

Таблица 4 – Механические свойства поволоков из сплава Al-18 % Si-4 % Cu-0,6 % Mg в зависимости от режимов закалки (старение 150°C, 5 ч)

№ п/п	Температура закалки и время выдержки	Механические свойства		
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
1	Без обработки	306	7,2	13,4
2	$480 \pm 10$ °C, 2 ч $\rightarrow$ $490 \pm 10$ °C, 2 ч	450	4,0	5,8
3	$480 \pm 10$ °C, 2 ч $\rightarrow$ $500 \pm 10$ °C, 0,5 ч	460	3,8	8,3
4	$480 \pm 10$ °C, 2 ч $\rightarrow$ $500 \pm 10$ °C, 1 ч	425	1,0	0
5	$490 \pm 10$ °C, 1 ч	437	1,2	0
6	$490 \pm 10$ °C, 3 ч	437	1,0	0

После закалки по режимам 5 и 6, не предусматривающим применение ступенчатого нагрева, в сплавах протекают процессы пережога, что обуславливает резкое снижение пластичности до 1-1,2 %.

Таким образом, за оптимальный режим термической обработки для поршневых сплавов был принят следующий: закалка – ступенчатый нагрев  $480 \pm 10$  °С →  $(490-500) \pm 10$  °С, с выдержкой 2 и 1 ч соответственно на нижней и верхней ступенях, охлаждение в холодную воду и последующее искусственное старение при 150 °С в течение 5 ч. В таблице 5 приведены физико-механические свойства исследуемых деформируемых сплавов после термической обработки по указанному режиму.

Таблица 5 – Физико-механические свойства поковок после закалки и старения

№ сплава	Механические свойства			Средний ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур, °С	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	50-200	200-450
1	425	6,4	9,9	18,6	22,4
2	372	4,6	7,4	19,0	22,1
4	450	4,0	5,8	18,0	20,6
5	400	2,8	6,1	19,2	21,5
6	470	5,0	5,2	18,8	22,0
7	400	3,5	-	19,0	22,7

Из данных таблиц видно, что в результате закалки и старения значительно повышается временное сопротивление разрыву деформированных заэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов до 370-470 МПа. Причем показатели пластичности остаются на высоком уровне для поршневых силуминов, а средний ТКЛР сплавов после термической обработки составляет  $(18,0 \div 19,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в интервале 50÷200 °С и  $(20,6 \div 22,7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в интервале 200÷450 °С.

Металлографические исследования деформируемых легированных заэвтектических силуминов после закалки и старения показали, что в микроструктуре термически обработанных поковок частицы первичного и эвтектического кремния принимают более округлую и сфероидизированную форму. Фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{CuAl}_2$ , которые не растворились полностью при нагреве и деформации заготовок, после закалки растворяются в  $\alpha$ -твердом растворе алюминия. Причем этот процесс приводит к усилению неоднородной травимости  $\alpha$ -твердого раствора.

### **Выводы**

Исследованы механические характеристики и ТКЛР слитков и поковок из опытных заэвтектических силуминов на основе Al – (15÷20) % Si, легированных медью, магнием, никелем, хром и другими элементами и модифицированных фосфор- и водородсодержащими реагентами.

За счет применения оптимальных режимов термической обработки (закалки и старения) показана возможность улучшения комплекса физико-механических свойств деформированных поршневых заэвтектических силуминов. Причем существенный прирост прочности для таких сплавов получен при сохранении высоких показателей пластичности по сравнению с литыми поршневыми силуминами и низким значением ТКЛР по отношению к деформируемым сплавам.

### Библиографический список

1. Хохлев В.М. Производство литейных алюминиево-кремниевых сплавов.– Москва: Металлургия, 1980.– с. 68 с.

2. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – Москва: Металлургия, 1977. – 271 с.
3. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.
4. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины // Технология металлов.– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.
5. Прудников А.Н. Формирование структуры заэвтектического силумина при литье слитков полунепрерывным способом / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении. –2 017.– Т. 4.– № 3.– С. 78-83.
6. Prudnikov, A. Production, structure and properties of engine pistons made from transeutectic deformable silumin // Steel in Translations – 2009 –v. 39.– pp. 391-393.
- 7 Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов.– 2014.– № 2.– С. 14 - 20.
8. Прудников А.Н. Использование термоциклической деформации для получения полуфабрикатов из заэвтектических силуминов / А.Н. Прудников, В.А. Прудников / В сборнике материалов 19-й Межд. научно-практической конф. «Металлургия: технологии, инновации, качество», 15-16 ноября 2015 г., г. Новокузнецк.– Новокузнецк, СибГИУ, 2015.–С. 15-18.
9. Афанасьев В.К. Технология получения слитков, деформированных заготовок и поршней из заэвтектического жаропрочного силумина и их свойства / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).– 2010.–№ 3.– С. 28-31.
10. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТРУДОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА <i>Кадыков В.Н., Мусатова А.И.</i> .....	188
ПОСТРОЕНИЕ НОРМАТИВНОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ОПЕРАТОРОВ-ВОЛОЧИЛЬЩИКОВ В РЕЖИМЕ МНОГОСТАНОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ <i>Кадыков В.Н., Мусатова А.И.</i> .....	196
РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНЫХ КАЛИБРОВОК АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Дорофеев В.В., Добрянский А.В., Фастыковский А.Р.</i> .....	202
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ НА ИЗНОС И УДАР В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ <i>Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю.</i> .....	208
ДЛИНА ЗОНЫ ПЛАВНОГО ПЕРЕХОДА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЁСТКОСТИ С- И Н-ОБРАЗНОГО ПРОФИЛЕЙ, ФОРМУЕМЫХ ПО ПОЛУЗАКРЫТЫМ СХЕМАМ <i>Филимонов А.В., Филимонов С.В., Филимонов В.И.</i> .....	213
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК Ковалева Т.В., Еремин Е.Н. ....	219
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕЛЮЩИХ ШАРАХ <i>Исагулов А.З., Аубакиров Д.Р.</i> .....	223
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ <i>Исагулов А.З., Исагулова Д.А.</i> .....	228
ДЕФОРМАЦИЯ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И СВОЙСТВА ПОРШНЕВЫХ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Прудников В.А.</i> .....	234
<b>СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ</b> .....	241
АНАЛИЗ УСЛОВИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНА ЭДП-104А В АЗОТНОЙ ПЛАЗМЕ <i>Галевский Г.В., Руднева В.В., Оршанская Е.Г., Галевский С.Г., Мишне И.</i> .....	241
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИЗ ОКСИДА ПРИ НАПЛАВКЕ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ <i>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Бащенко Л.П., Михно А.Р.</i> .....	244
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ $WO_3$ АЛЮМИНИЕМ ПРИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ <i>Крюков Р.Е., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Козырев Н.А., Шурупов В.М.</i> .....	251
ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА <i>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Михно А.Р., Бащенко Л.П.</i> .....	256
ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ ФЕРРОХРОМА <i>Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Прудников А.Н., Михно А.Р.</i> .....	261
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОВШЕВОГО ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В КАЧЕСТВЕ ФЛЮС – ДОБАВКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ <i>Михно А.Р., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А.</i> .....	267