

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, В.М. Беспалов, А.Л. Трифоненков

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Рассмотрено влияние химического состава сплавов на основе алюминия и параметров непрерывного литья и прокатки, а также непрерывного литья и прокатки-прессования, на свойства электротехнической катанки. Приведено описание установки для кручения и методика определения реологических характеристик для сплавов алюминия с редкоземельными и переходными металлами в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров обработки. Приведены кривые изменения сопротивления деформации исследуемых сплавов в интервале температур 20–550 °С и скорости деформации 0,5–10 с⁻¹.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; редкоземельные и переходные металлы; сопротивление металла деформации; реология; непрерывное литье; прокатка; прессование; кручение; катанка.

Для полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, получаемых традиционными методами полунепрерывного литья слитков и их обработки давлением, возможности существенного повышения физико-механических свойств к настоящему времени во многом исчерпаны. Тем не менее, легирование нетрадиционными компонентами сохраняет перспективы улучшения эксплуатационных характеристик этих сплавов [1]. Основными сплавами для получения литых и деформированных полуфабрикатов из алюминия служат Al–Mn, Al–Mg, Al–Mg–Si (авиали), Al–Cu–Si (дюралю), Al–Si (силумины), Al–Zn–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, Al–Cu–Mg–Ni–Fe, Al–Cu–Mg–Si, а в последние годы особо востребованы сплавы систем Al–Ti–B, Al–Zr, Al–Ce, Al–Li [2]. Особую роль при формировании комплекса электрофизических и механических свойств изделий из этих сплавов играет их метод получения.

Для изготовления катанки из алюминия и сплава АВЕ, имеющей большие объемы производства, применяется метод непрерывного литья и прокатки на литейно-прокатных агрегатах. Недостаточная прочность алюминиевой проволоки, изготовленной из такой катанки, даже при нормальной температуре эксплуатации под воздействием длительной нагрузки может привести к ее разрушению. При этом чем больше температура, тем ниже ее стойкость. Вместе с тем за рубежом для изготовления термостойких проводов успешно применяют проволоку из сплавов алюминия с переходными (ПМ) и редкоземельными металлами (РЗМ), которая имеет высокие прочностные свойства при длительно действующих температурах нагрева до 230 °С. Дальнейшее развитие методов

обработки таких алюминиевых сплавов в нашей стране сдерживается отсутствием новых сплавов, технологий и оборудования для получения катанки из них [3]. В связи с этим актуальность создания сплавов таких систем легирования, новых методов получения из них литых и деформированных полуфабрикатов, а также исследования их реологических свойств для совершенствования технологий производства не вызывает сомнений.

С целью повышения эффективности получения катанки электротехнического назначения из новых алюминиевых сплавов систем Al–ПМ и Al–РЗМ, которые активно внедряются в настоящее время для производства электропроводников с новыми электрофизическими и эксплуатационными свойствами на Иркутском алюминиевом заводе, учеными кафедры обработки металлов давлением совместно с сотрудниками ООО «РУСАЛ ИТЦ» были разработаны новые сплавы [4, 5], установка для исследования их реологических свойств [6], а также технология непрерывного литья и прокатки-прессования [7].

При проектировании испытательной установки [6] было учтено, что процессы обработки алюминиевых сплавов характеризуются высокими скоростями и степенями деформации, которые трудно смоделировать при классических испытаниях на растяжение и сжатие, поэтому за основу был взят способ испытаний на кручение.

В соответствии с методикой для определения истинного сопротивления деформации τ методом кручения [2] производится скручивание двух образцов разных диаметров (радиусов ρ) при идентичных температурно-скоростных условиях. При

Обработка металлов давлением

определении момента сил сечение сплошного образца представляют в виде совокупности отдельных трубок и находят его по формуле

$$M_1 = \frac{2}{3} \pi (\rho_1^3 - \rho_0^3) \tau_1 + \frac{2}{3} \pi (\rho_2^3 - \rho_1^3) \tau_2 + \dots + \frac{2}{3} \pi (\rho_{n-1}^3 - \rho_{n-2}^3) \tau_{n-1} + \frac{2}{3} \pi (\rho_n^3 - \rho_{n-1}^3) \tau_n$$

и для второго образца

$$M_2 = \frac{2}{3} \pi (\rho_1^3 - \rho_0^3) \tau_1 + \frac{2}{3} \pi (\rho_2^3 - \rho_1^3) \tau_2 + \dots + \frac{2}{3} \pi (\rho_{n-1}^3 - \rho_{n-2}^3) \tau_{n-1}.$$

Вычитая из первого равенства второе, получаем

$$M_1 - M_2 = \frac{2}{3} \pi (\rho_n^3 - \rho_{n-1}^3) \tau_n,$$

откуда, вводя обозначения $\rho_n = \rho_1$; $\rho_{n-1} = \rho_2$; $\tau_n = \tau$, имеем

$$\tau = \frac{3(M_1 - M_2)}{2\pi(\rho_1^3 - \rho_2^3)}.$$

Таким образом, последняя формула дает истинное сопротивление деформации для трубчатого образца, толщина стенки которого равна $(\rho_1 - \rho_2)$, мм. Для пересчета числа скручиваний в деформацию сдвига используют соотношение

$$\gamma = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2l} \varphi,$$

где l – длина рабочей части образца, мм; $\varphi = 2\pi l$ – угол скручивания (угол поворота шпинделя в радианах); а скорость деформации определяют по формуле

$$\xi = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2l} \omega,$$

где ω – угловая скорость вращения шпинделя, с^{-1} .

Установка для кручения была разработана и смонтирована на базе универсального сверлильного станка модели 2Н135. Технические данные приведены в табл. 1.

Прочность рабочих механизмов и мощность привода обеспечивается жесткостью конструкции установки, что исключает падения заданной скорости деформации в момент испытания.

Относительно низкая температура горячей обработки алюминиевых сплавов (от 350 до 550 °С) не позволяет проводить ее измерение при помощи обычной фотозлектрической аппаратуры. Поэтому нагрев образца контролировался по температуре расплава, в который помещен образец. В связи с этим установка для проведения опытов на скручивание имеет вертикальное расположение шпинделя. За счет нагрева образца в расплаве солей достигается равномерное распределение температуры по всему сечению образца, что очень важно при высокотемпературных испытаниях.

Конструктивно установка для испытания на скручивание (рис. 1) состоит из активного захвата 3,

связанного с регулируемым приводом вращения, и пассивного захвата 6, расположенного соосно с активным захватом. В верхней части стакана 7 расположен активный захват с возможностью вращения вокруг оси, а в нижней части – пассивный захват. Стакан снабжен системой продувки 4 и жестко соединен с валом 9, оснащенный системой охлаждения, а привод активного захвата имеет тормозные колодки 2.

Таблица 1
Основные технические данные установки на кручение

Параметры	Значение
Допустимый крутящий момент, Н·м	250
Мощность электродвигателя, кВт	3,0
Скорость вращения шпинделя, об/мин:	
минимальная	0,1
максимальная	2500
Время минимальной паузы, с	0,3
Жесткость вращающегося шпинделя, Н·м/рад:	
по низу	2500
по верху	1000

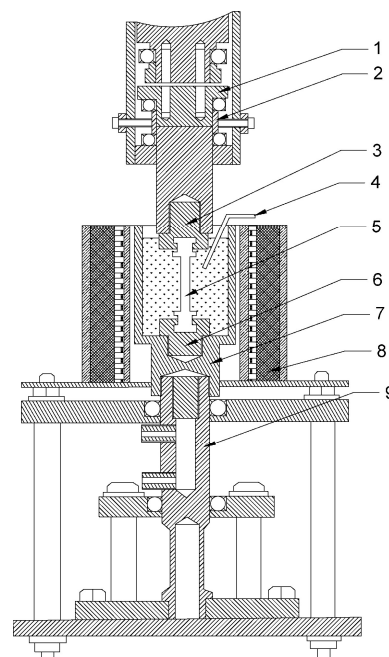


Рис. 1. Схема установки для испытаний на горячее скручивание с нагревом в расплаве солей: 1 – электромагнитная муфта; 2 – тормозные колодки; 3 – активный захват; 4 – система продувки; 5 – образец для скручивания; 6 – пассивный захват; 7 – стакан; 8 – печь; 9 – вал с водяным охлаждением

Работа установки заключается в следующем. 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 регу-

лирование 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 верхняя его 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, приводится в движение от электродвигателя электромагнитной муфтой 1, передавая крутящий момент на вал 9 через образец 5. Изменение крутящего момента на валу фиксируется тензодатчиками. После отключения электромагнитной муфты привод активного захвата останавливается за счет срабатывания тормозных колодок 2.

Установка оснащена современным оборудованием для управления привода активного захвата. Сбор информации с датчиков и ее обработка производится при помощи тензостанции Zet017-T8, позволяющая регистрировать различные по своей частоте нагрузки в реальном времени.

Для исследований реологических свойств полуфабрикатов в виде катанки были выбраны четыре сплава, химический состав которых приведен в табл. 2.

Катанку из сплавов Zr-1, Zr-2 получали на Иркутском алюминиевом заводе методом непрерывного литья и прокатки. Литейно-прокатный агрегат имел в своем составе печь-миксер, роторный кристаллизатор, прокатный стан из 14 клетей с горизонтально и вертикально расположенными валками и две моталки. Температура расплава в миксере составляла около 800 °С, а перед заливкой в роторный кристаллизатор 750–760 °С. После получения литой заготовки в роторном кристаллизаторе металл поступал на непрерывный сортопрокатный стан, на выходе из которого получали катанку диаметром 9,5 мм, температура которой находилась в диапазоне 310–350 °С.

Катанка из сплава P3M-1 и P3M-2 была изготовлена методом непрерывного литья и прокатки-прессования [7]. Температура плавки в зависимости от химического состава сплава составляла 750–790 °С, а температура заливки расплава в валки 740–780 °С.

Для определения закономерностей изменения сопротивления деформации металла при варьировании степени деформации $\ln\lambda$ в достаточно широком диапазоне значений, полученную катанку подвергали испытаниям на кручение. Уровни варьирования факторов процесса для экспериментальных сплавов представлены в табл. 3.

Таблица 2
Химический состав сплавов

Обозначение сплава	Содержание, %				
	Al	Fe	Zr	P3M	Si
Zr-1	Основа	0,273	0,2645	–	0,071
Zr-2	Основа	0,288	0,1980	–	0,067
P3M-1	Основа	–	–	не > 0,5 %	–
P3M-2	Основа	0,6	–	7,0	0,3

Таблица 3
Уровни варьирования факторов эксперимента горячего скручивания

Факторы			Ед. измерения	Варьирование факторов		
№	Название	Обозначение		1	2	3
1	Температура нагрева заготовки	T	°С	320	400	550
2	Скорость деформации	ξ	с^{-1}	0,5	1,5	10

В результате исследований получены данные по сопротивлению деформации для исследуемых сплавов. Графики зависимости сопротивления деформации σ_s от степени деформации $\ln\lambda$ при различных скоростях деформации ξ представлены на рис. 2–5.

Таким образом, были проведены исследования по определению сопротивления деформации деформированных полуфабрикатов из запатентованных алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления электротехнической катанки. Получен ряд кривых упрочнения, анализируя которые можно сделать вывод, что для всех исследуемых сплавов с увеличением температуры испытаний скоростное упрочнение возрастает. Так, например, для сплава P3M-2 при температуре 320 °С и величине деформации 0,5 возрастание скорости деформации с 0,5 до 10 с^{-1} приводит к повышению сопротивления деформации в 1,3 раза, а при температуре 550 °С – в 2,3 раза. Интенсивность разупрочнения исследуемых сплавов увеличивается с повышением скорости деформации и уменьшается с ростом температуры испытаний.

Полученные данные были использованы для определения энергосиловых параметров процессов обработки новых сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами методами непрерывного литья и ОМД при производстве катанки и проектировании нового оборудования для их реализации с высокими скоростями кристаллизации и степенями деформации на Иркутском алюминиевом заводе.

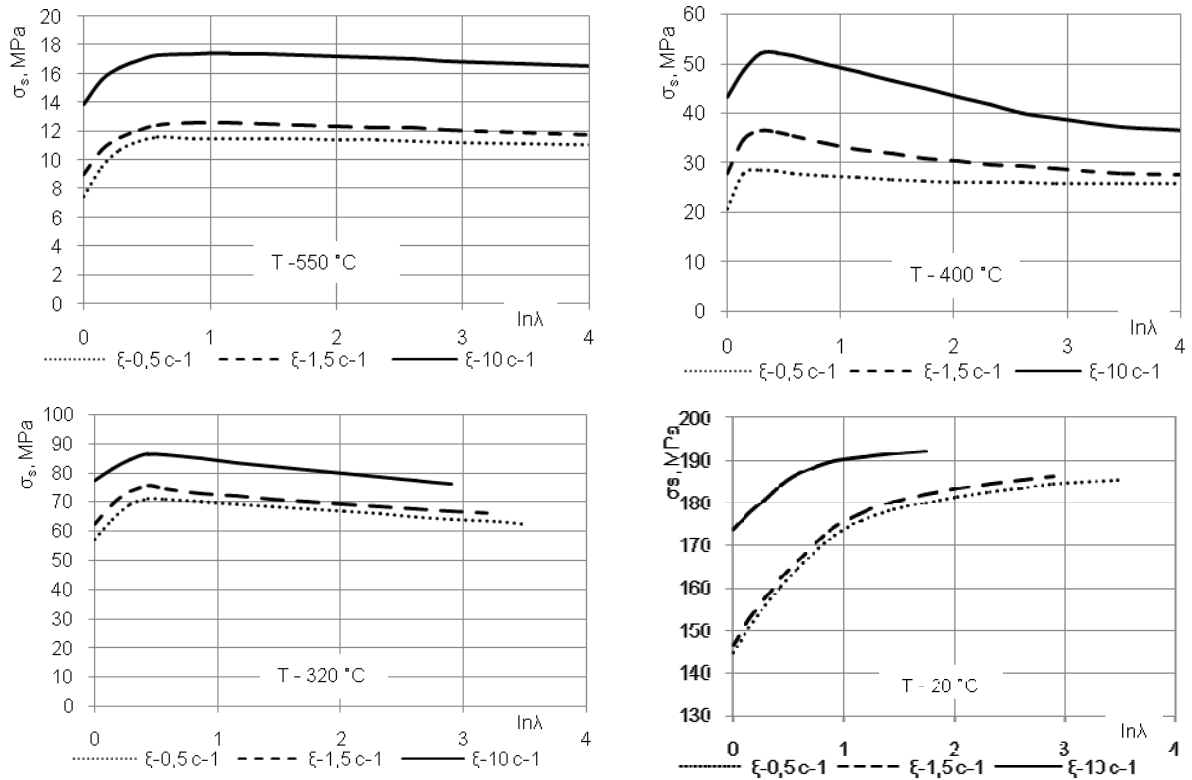


Рис. 2. Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава Zr-1 от степени деформации $\ln \lambda$ при различных скоростях деформации ξ

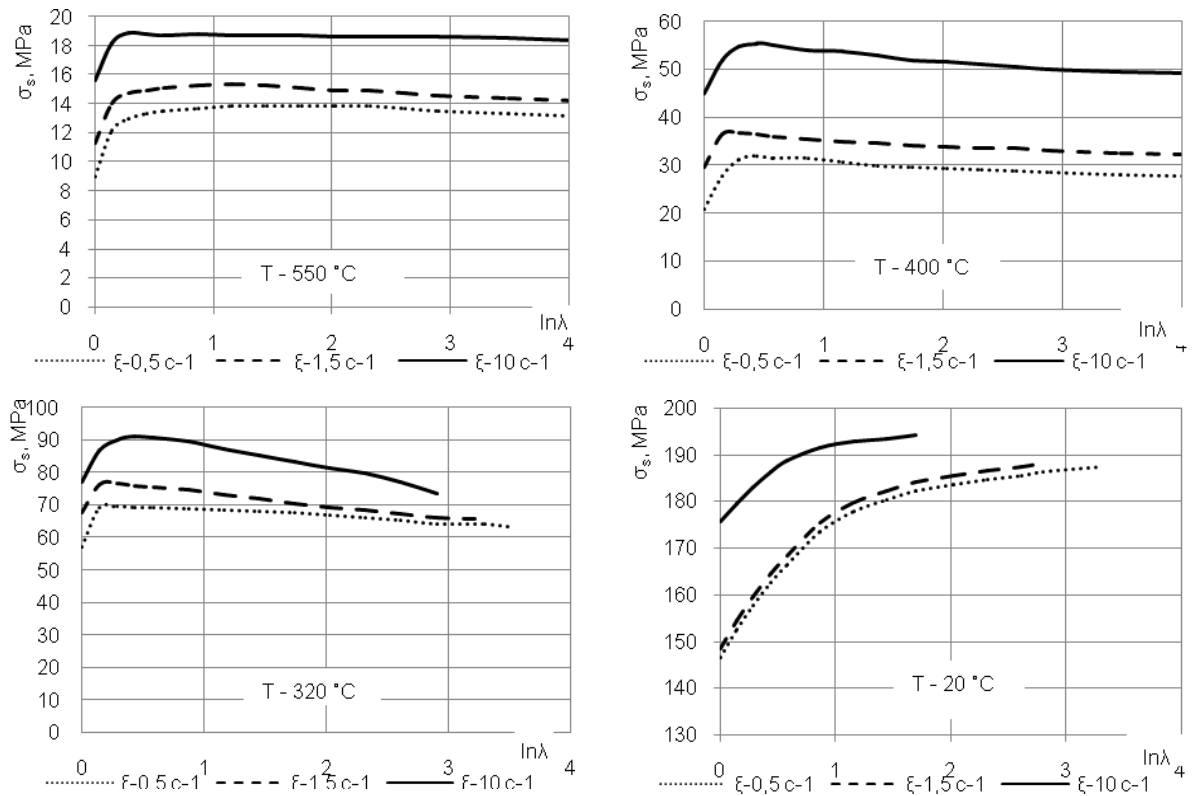


Рис. 3. Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава Zr-2 от степени деформации $\ln \lambda$ при различных скоростях деформации ξ

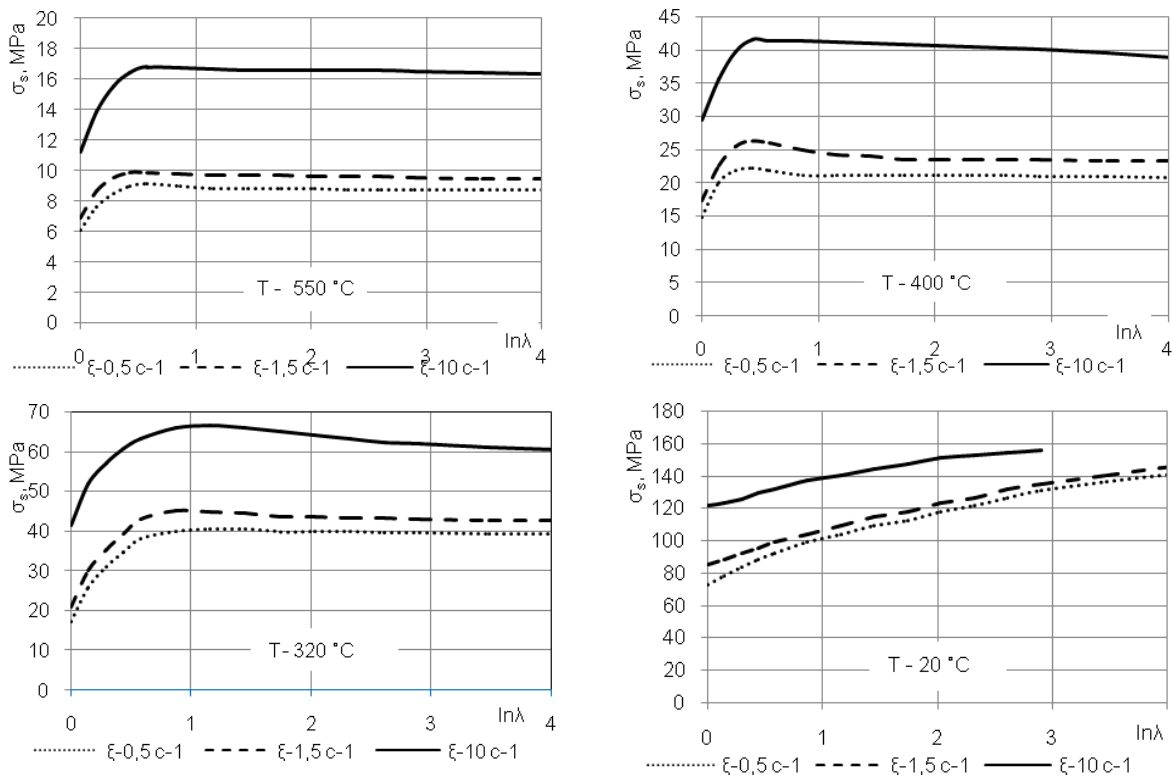


Рис. 4. Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава РЗМ-1 от степени деформации $\ln \lambda$ при различных скоростях деформации ξ

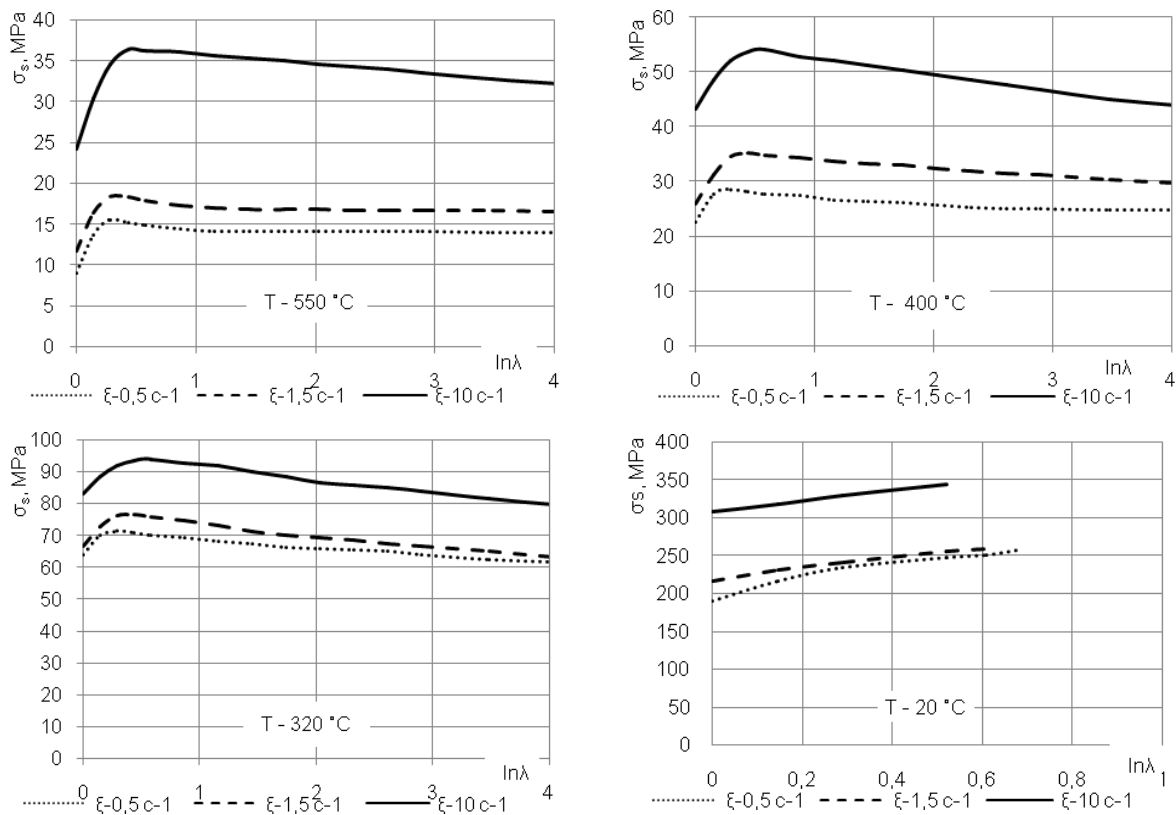


Рис. 5. Зависимость сопротивления деформации σ_s сплава РЗМ-2 от степени деформации $\ln \lambda$ при различных скоростях деформации ξ

Обработка металлов давлением

Данная работа выполнена в рамках реализации 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».

Литература

1. Горбунов, Ю.А. Основные характеристики и перспективы развития сплавов алюминия с высокой дисперсностью фаз легирующих элементов / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы – 2013: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2013. – С. 585–590.
2. Белый, Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий / Д.И. Белый // Кабели и Провода. – 2012. – № 1. – С. 8–15.
3. Грищенко, Н.А. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов и др. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 196 с.
4. Пат. 2458151 Российская Федерация, МПК С21С 1/02. Алюминиевый сплав / В.Н. Баранов, В.С. Биронт, Н.Н. Довженко, В.А. Падалка, С.Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, В.Ф. Фролов, Е.Н. Чичук; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр» (RU). – № 2010150493/02; заявл. 09.12.2010; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
5. Пат. 2458170 Российская Федерация, МПК С22С 21/00. Алюминиевый сплав / В.Н. Баранов, В.С. Биронт, Р.И. Галиев, Н.Н. Довженко, Е.С. Лопатина, В.А. Падалка, С.Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, В.Ф. Фролов, Е.Н. Чичук; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр» (RU). – № 2011103242/02; заявл. 31.01.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22. Пат. 130708 Российская Федерация, МПК G01N 3/22.
6. Установка для испытания на скручивание / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, Н.А. Грищенко и др., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (RU). – № 2013110265/28; заявл. 07.03.2013; опубл. 27.07.2013. Бюл. № 21.
7. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: моногр. / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 343 с.

Сидельников Сергей Борисович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; sbs270359@yandex.ru.

Самчук Антон Павлович, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; Samchukanton@gmail.com.

Сидельников Андрей Сергеевич, ассистент кафедры литейного производства, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; sbs270359@yandex.ru.

Ворошилов Денис Сергеевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры обработки металлов давлением, Института цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; sbs270359@yandex.ru.

Беспалов Вадим Михайлович, ведущий программист кафедры обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; sbs270359@yandex.ru.

Трифоненков Антон Леонидович, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; sbs270359@yandex.ru.

Поступила в редакцию 11 марта 2015 г.

RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTROTECHNICAL WIRE ROD OF ALUMINUM ALLOYS WITH TRANSITION AND RARE EARTH METALS OBTAINED BY THE METHOD OF CONTINUOUS CASTING AND METAL FORMING

S.B. Sidel'nikov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, sbs270359@yandex.ru,

A.P. Samchuk, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, Samchukanton@gmail.com,

A.S. Sidel'nikov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, sbs270359@yandex.ru,

D.S. Voroshilov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, sbs270359@yandex.ru,

V.M. Bespalov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, sbs270359@yandex.ru,

A.L. Trifonenkov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, sbs270359@yandex.ru

The influence of the chemical composition of aluminum-based alloys, continuous casting and rolling parameters together with continuous casting and rolling-extruding on the properties of electro technical wire rod was studied. The installation for torsion is described. The method of determining the rheological characteristics for aluminum alloys with rare earth and transition metals in a wide range of variation temperature-velocity and deformation processing parameters are given. The curves of deformation resistance change of investigated alloys in the temperature range from 20 to 550 °C and strain rate equal to 0.5–10 s⁻¹ are described.

Keywords: aluminum alloys; rare earth and transition metals; resistance to deformation of the metal; rheology; continuous casting; rolling; extruding; torsion; wire rod.

References

1. Gorbunov Yu.A. [The Main Characteristics and Prospects of Development of Aluminum Alloys with High Dispersion of Alloy Phases]. *Tsvetnye metally – 2013* [Non-Ferrous Metals – 2013]. Krasnoyarsk, Verso Publ., 2013, pp. 585–590. (in Russ.)
2. Belyy D.I. [Aluminium Alloys for Conductive Wires of Cable Products]. *Kabeli i provoda*, 2012, no. 1, pp. 8–15. (in Russ.)
3. Grishchenko N.A., Sidel'nikov S.B., Gubanov I.Yu. et al. *Mekhanicheskie svoystva alyuminiyevykh splavov* [Mechanical Properties of Aluminum Alloys]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2012. 196 p.
4. Baranov V.N. et al. *Alyuminiyevyy splav* [Aluminum Alloy]. Pat RF, no. 2458151, 2012.
5. Baranov V.N. et al. *Alyuminiyevyy splav* [Aluminum Alloy]. Pat RF, no. 2458170, 2012.
6. Sidel'nikov S.B. et al. *Ustanovka dlya ispytaniya na skruchivanie* [Installation for Torsion Testing]. Pat. RF, no. 130708, 2013.
7. Sidel'nikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannyye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov* [Combined Methods of Treatments of Non-Ferrous Metals and Alloys]. Moscow, MAKS Press Publ., 2005. 344 p.

Received 11 March 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

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 и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 89–95.

REFERENCE TO ARTICLE

Sidel'nikov S.B., Samchuk A.P., Sidel'nikov A.S., Voroshilov D.S., Bespalov V.M., Trifonenkov A.L. Research of Rheological Properties of Electrotechnical Wire Rod of Aluminum Alloys with Transition and Rare Earth Metals Obtained by the Method of Continuous Casting And Metal Forming. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 89–95. (in Russ.)