

www.rudmet.ru

ISSN 0372-2929

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.
(№ 921)

9. 2019



ИНСТИТУТУ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

60 ЛЕТ

Реклама





В. Н. Баранов,
директор ИЦМиМ,
канд. техн наук, доцент

Уважаемые читатели!

В текущем году исполняется 60 лет с первого выпуска металлургов на Красноярской земле.

Институт цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) является правопреемником и хранителем знаний, традиций Красноярского института цветных металлов им. М. И. Калинина, образованного в далеком 1958 г. Сегодня ИЦМиМ ведет подготовку высококвалифицированных кадров для нужд крупных градообразующих металлургических предприятий России и дальнего зарубежья, таких как ОК РУСАЛ, ПАО «Полюс», ОАО «Красцветмет», ОАО «Красмаш» и др. Ежегодно в стенах института проходят обучение более тысячи студентов очного и заочного отделений по направлениям подготовки: материаловедение, автоматизация технологических процессов и производств, химия, техносферная безопасность.

ИЦМиМ развивается и как уникальный научный центр. Здесь ведут научные исследования, охватывающие широкий спектр технологических проблем получения цветных металлов и их глубокой переработки для различных отраслей промышленности, производства продукции с добавленной стоимостью и инновационных цифровых продуктов. Ежегодно более ста статей сотрудников института публикуются в ведущих научно-технических журналах.

В юбилейный год я рад представить вашему вниманию выпуск журнала «Цветные металлы», посвященный результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в нашем институте.

Желаю всем будущим авторам журнала новых научных и творческих успехов!

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Журнал выпускается при участии: ПАО «ГМК «Норильский никель», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГБУК «Государственный Эрмитаж»;
при содействии: ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат», Научно-технического союза по горному делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Временно исполняющий обязанности главного редактора **А. В. Сысоев**
Зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**

З. С. Абишева, Р. Х. Акчурин, М. В. Астахов (редактор раздела «Наноструктурированные металлы и материалы»), **В. Ю. Бажин, Н. А. Белов** (редактор разделов «Металлообработка», «Материаловедение»), **В. А. Бочаров** (редактор раздела «Обогащение»), **Г. Ю. Боярко, В. Н. Бричкин, В. А. Брюквин, Г. М. Вольдман** (редактор раздела «Редкие металлы, полупроводники»), **Н. В. Воробьев-Десятовский, В. В. Геневски, Л. А. Глазунов, В. Б. Деев, В. А. Дмитриев, А. М. Дриц, А. В. Зиновьев, В. А. Игнаткина, М. Г. Исаенкова, В. С. Кальченко, С. С. Киров, Б. Г. Киселёв, П. А. Козлов, С. И. Корнеев** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Б. А. Котляр, Ю. А. Котляр, В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **Ф. Д. Ларичкин, А. Б. Лебедев, Е. А. Левашов** (редактор раздела «Композиционные материалы и многофункциональные покрытия»), **Ю. В. Левинский, Г. С. Макаров, Н. Е. Мальцев** (редактор раздела «Автоматизация»), **Ю. Н. Мансуров, М. А. Меретуков, А. М. Мицик, В. И. Москвитин, С. С. Набойченко, А. И. Николаев, В. В. Пронников, А. М. Птицын, В. К. Румянцев, А. Г. Рыжов, Ф. М. Сафин, А. Н. Селезнёв, Е. Н. Селиванов, А. В. Сулицин, А. В. Тарасов, А. Н. Фёдоров, Л. Ш. Цемехман, Л. Б. Цымбулов** (редактор раздела «Тяжелые цветные металлы»), **И. И. Чернов, М. Р. Шапировский, Н. В. Шаркина** (редакционный координатор), **В. И. Щёголев**.
Зарубежные члены редколлегии: **Ж. Баатархуу** (Монголия), **В. В. Геневски** (Болгария), **Д. Дрейсингер** (Канада), **Е. Жак** (Австралия), **К. Кнуутила** (Финляндия), **Б. Фридрих** (Германия).

РЕДАКЦИЯ:

зам. главного редактора **А. Г. Воробьев**; редакционный координатор **Н. В. Шаркина**;
выпускающий редактор **А. Ю. Слепцова**; редактор **Г. Е. Форысенкова**; мл. редактор **П. А. Володина**;
корректор **Ю. И. Королёва**;
ответственная за предпечатную подготовку издания **О. Ю. Жукова**.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, а/я № 71

Адрес редакции: Москва, Ленинский просп., д. 6,
стр. 2, НИТУ «МИСиС», комн. 624
Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71
Тел./факс: (495) 955-01-75; моб.: 8-926-504-89-75
Эл. почта: tsvetmet@rudmet.ru; интернет: www.rudmet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) (Свидетельство ПИ № ФС77-69818 от 29.05.2017 г.).
Товарный знак и название «Цветные металлы» являются исключительной собственностью Издательского дома «Руда и Металлы».

Материалы, отмеченные «Реклама», публикуются на правах рекламы.

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель.

Все публикуемые материалы научно-технического характера проходят обязательную стадию рецензирования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор.

За сроки размещения опубликованных статей в базе данных Scopus редакция ответственности не несет.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведение материалов, публикуемых в журнале, возможна только с письменного разрешения редакции.

При перепечатке ссылка на журнал «Цветные металлы» обязательна.

Отпечатано в типографии «Печатных дел мастер»
Адрес типографии: 109518, Москва, 1-й Гайворонский проезд, д. 4.

Подписано в печать с оригинал-макета 01.10.2019.
Формат 60x90 1/8. Печ. л. 11. Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Тираж 1500 экз. Цена свободная.
Дата выхода из печати 08.10.2019.

ISSN 0372-2929



9 770372 292006 >

Содержание

ИНСТИТУТУ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ — 60 ЛЕТ

Довженко Н. Н., Гильманшина Т. Р. Сибирская кузница кадров для цветной металлургии 4

Экономика и управление производством

Вострикова Н. М., Безрукова Н. П. Фундаментальная химическая подготовка как этап профессиональной подготовки бакалавров-металлургов 9

Тяжелые цветные металлы

Сайкова С. В., Пантелеева М. В., Сайкова Д. И. Катионообменная переработка растворов автоклавного вскрытия окисленных никелевых руд Буруктальского месторождения 16

Благородные металлы и их сплавы

Рюмин А. И., Белоусов О. В., Соркина Г. А., Сиротина Д. Ю. Соосаждение меди в соль транс-дихлордиаминпалладия 22

Сиротина Д. Ю., Павлова Е. И., Брагин В. И., Белоусова Н. В. Исследование процесса восстановления палладия параформальдегидом 27

Легкие металлы, углеродные материалы

Михалев Ю. Г., Жаринова Н. Ю. Режимы массопереноса при поляризации жидкого металлического электрода в расплавленных солях и выход по току 32

Финин Д. В., Куранов А. В., Ковтун О. Н., Колмакова Л. П. Опыт использования бурых углей при спекании нефелино-известково-содовой шихты во вращающихся печах применительно к условиям АО «РУСАЛ Ачинск» 36

Ясинский А. С., Падамата С. К., Поляков П. В., Виноградов О. О. Анодный процесс на алюминиевой бронзе в низкотемпературных криолитоглиноземных расплавах и суспензиях 42

Пискажова Т. В., Шайдулин Е. Р., Донцова Т. В., Авдеев Ю. О. Управление тепловым балансом алюминиевых электролизеров 50

Автоматизация, аналитический контроль

Якимов И. С., Безрукова О. Е., Дубинин П. С., Шиманский А. Ф. Рентгеновский технологический контроль на предприятиях горно-металлургического комплекса цветной металлургии 56

Металлообработка

Сидельников С. Б., Ворошилов Д. С., Первухин М. В., Мотков М. М. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al – PЗМ с применением совмещенной обработки 63

Веретнова Т. А., Царенко А. А., Веретнов А. Г., Шестаков И. Я. Повышение эффективности электроконтактной резки металла путем применения системы управления 69

Ильин А. А., Солдатов С. В., Белоусова Н. В. Снижение количества усадочных дефектов при литье чушки из алюминиевых сплавов с использованием компьютерного моделирования 76

Довженко Н. Н., Руциц С. В., Довженко И. Н., Юрьев П. О. Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава P-1580, экономнолегированного скандием, при горячей деформации 80

Наши юбиляры

Сентдьерди Гезе — 80 лет 88

Сиразутдинову Геннадию Абдулловичу — 80 лет 87

*Журнал включен в Международные базы данных Scopus (2-й квартиль, 2018),
а также Chemical Abstracts Service*

Журнал по решению ВАК Минобрнауки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых, по металлургии, по экономике, по химии.

Статьи всех авторов, в том числе аспирантов, публикуются в порядке общей очереди бесплатно (за исключением статей рекламного характера).

Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава Р-1580, экономнолегированного скандием, при горячей деформации

УДК 669.715:621.74



Н. Н. Довженко, профессор кафедры «Машиностроение», эл. почта: n.dovzhenko@bk.ru

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия



С. В. Рушиц, профессор кафедры «Материаловедение и физикохимия материалов»

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия



И. Н. Довженко, доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия



П. О. Юрьев, инженер-исследователь ОПНИ (обеспечение прикладных научных исследований) НИЧ

С использованием комплекса физического моделирования термомеханических процессов Gleeble 3800 выполнено исследование деформационного поведения экспериментального экономнолегированного скандием сплава Р-1580, разработанного ОК РУСАЛ, с содержанием основных легирующих элементов (здесь и далее — % (мас.)): Al – 5 Mg – 0,6 Mn – 0,10 Sc – 0,11 Zr в условиях одноосной осадки в интервале температур 350–450 °С и в диапазоне скоростей деформации 0,01–30 с⁻¹. Для фиксированных температур 350, 375, 400, 425 и 450 °С и скоростей деформации 0,01, 0,1, 1, 10 и 30 с⁻¹ получены экспериментальные диаграммы деформации исследуемого сплава в координатах истинные напряжения — истинные деформации. При низких скоростях деформации (0,01–1,0 с⁻¹) напряжения текучести уже после небольшой деформации достигают установившегося уровня, отвечающего балансу между процессами деформационного упрочнения и динамического разупрочнения (возврата). Деформация с высокими скоростями (10 и 30 с⁻¹) сопровождается деформационным разогревом образцов и падением напряжений текучести с ростом величины деформации. После внесения поправок на деформационный разогрев диаграммы деформации также приобретают вид, характерный для горячей деформации, контролируемой динамическим возвратом. Полученные результаты полностью согласуются с известными представлениями о том, что совместное влияние температуры и скорости деформирования на деформационное поведение металлических материалов описывается параметром Зинера – Холломона. Получены аналитические выражения для установившихся напряжений текучести как функции параметра Зинера – Холломона, которые дают возможность предсказывать сопротивление пластической деформации сплава в широком диапазоне температур и скоростей деформации. Построена диаграмма, позволяющая прогнозировать значение коэффициента скоростной зависимости для заданного температурно-скоростного режима деформации.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, физическое моделирование, параметр Зинера – Холломона, горячая деформация, напряжение течения.

DOI: 10.17580/tsm.2019.09.13

Введение

Сплавы системы Al – Mg с небольшими добавками циркония и скандия, способствующими измельчению зеренной структуры и обеспечивающими дополнительное дисперсионное упрочнение, успешно используют в качестве легких сплавов, обладающих высокой прочностью, хорошей деформируемостью, коррозионной стойкостью и свариваемостью [1–5].

Наибольшее распространение в авиационно-космической промышленности нашел высокопрочный термически неупрочняемый алюминиевый сплав 01570.

Сплав 01570 системы Al – Mg – Sc был разработан Всероссийским институтом легких сплавов (ВИЛС) в 1970-х гг. Он содержит: 5,8–6,8 Mg; 0,3–0,5 Sc; 0,1–0,25 Mn; 0,05–0,15 Zr, а также добавки других элементов. Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью, прочностью и хорошей свариваемостью: предел прочности $\sigma_b = 370–390$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 245$ МПа и относительное удлинение $\delta = 15$ %. Применение сплава 01570 вместо сплава АМг6 обеспечивает выигрыш по массе до 20 % [4].

Вместе с тем для более широкого применения неупрочняемых алюминиевых сплавов системы Al –

Mg – Sc в автомобильной промышленности [5] и судостроении в настоящее время идут работы по поиску экономнолегированных сплавов со сниженным содержанием дорогостоящего скандия, например до 0,05–0,07. В настоящей работе рассмотрен новый сплав P-1580, разработанный в ОК РУСАЛ, с содержанием основных легирующих элементов: Al – 5 Mg – 0,6 Mn – 0,10 Sc – 0,11 Zr [6].

В процессе производства полуфабрикатов и конечных изделий указанные сплавы подвергают высокотемпературной деформации прокаткой или прессованием. Для оптимизации технологических режимов обработки и обеспечения требуемого уровня механических свойств, структурного и текстурного состояния важно иметь информацию об особенностях деформационного поведения сплавов в условиях горячей деформации.

Для выбора режимов горячей деформации и применения для моделирования процессов в программных комплексах типа Deform[®] или QForm необходимо иметь аналитическое выражение, позволяющее оценивать напряжения текучести в зависимости от конкретных температурно-скоростных параметров деформации [7].

Для исследования совместного влияния температуры и скорости деформации $\dot{\epsilon}$ на стадии установившегося течения широко используют параметр Зинера – Холломона [8]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \quad (1)$$

где T — абсолютная температура; Q — энергия активации процессов, контролирующих пластическую деформацию; R — газовая постоянная.

Уменьшение параметра Z за счет снижения скорости деформации или роста температуры приводит к падению напряжений текучести, и наоборот.

Известно, что в условиях установившегося баланса между процессами упрочнения и разупрочнения параметр Z связан с установившимися напряжениями σ_s эмпирическим выражением Селларса [9]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A[\text{sh}(\alpha\sigma_s)]^n, \quad (2)$$

где A , α , n — константы материала. При малых напряжениях ($\alpha\sigma_s < 0,8$) выражение (2) переходит в степенной закон ползучести $\dot{\epsilon} \sim \sigma_s^n$, при высоких напряжениях — в экспоненциальный закон $\dot{\epsilon} \sim \exp(\beta\sigma)$, где β — коэффициент материала. Согласно (2), установившиеся напряжения σ_s определяют выражением

$$\sigma_s = \frac{1}{\alpha} \left(\text{arcsh} \left(\frac{Z}{A} \right) \right)^{1/n}. \quad (3)$$

Цель настоящего исследования — изучение деформационного поведения экономнолегированного сплава P-1580 и сбор данных, необходимых для опре-

деления оптимальных температурно-скоростных режимов его горячей прокатки.

Материал и методика исследований

Образцы по заказу ОК РУСАЛ для исследования изготавливали в АО «Алюминий Металлург Рус» из центрального объема по толщине литого полунепрерывным способом и гомогенизированного в промышленных условиях слитка диаметром 125 мм из сплава P-1580.

Моделирование горячей деформации одноосным сжатием (осадкой) осуществляли на симуляторе термомеханических процессов Gleeble 3800 с использованием модуля HydraWedge.

Испытания на одноосную осадку проводили на цилиндрических образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Для уменьшения контактного трения между образцом и бойками помещали графитовую фольгу толщиной 0,13 мм. Нагрев образца, помещенного в рабочую камеру с низким вакуумом, осуществляли прямым пропусканием через него электрического тока. Температуру контролировали хромель-алюмелевой термопарой, приваренной к центральной части образца. Температурный градиент по длине образца не превышал 3 °С.

Образцы нагревали до температуры деформации со скоростью 3 °С/с. После достижения заданной температуры следовала изотермическая выдержка в течение 10 мин для выравнивания температуры по объему образца. Деформацию осуществляли при температурах 350, 375, 400, 425 и 450 °С со скоростями деформации 0,01, 0,1, 1, 10 и 30 с⁻¹. В процессе эксперимента фиксировали температуру образца T , усилие деформации F и текущее изменение высоты образца $\Delta h = h - h_0$. Автоматически с помощью встроенной программы рассчитывали истинную (логарифмическую) деформацию ϵ и истинные напряжения σ , предполагая неизменность объема образца и сохранение им цилиндрической формы в процессе испытания:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right), \quad (4)$$

$$\rho = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d^2/4} = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{4} \frac{h_0}{h} d_0^2\right)}, \quad (5)$$

здесь h_0 и h — начальная и текущая высота образца соответственно; S — текущая площадь сечения образца; d_0 и d — начальный и текущий диаметр образца соответственно. Деформацию сжатием осуществляли до величины $\epsilon = 1,2$.

Результаты исследования и обсуждение

Экспериментальные диаграммы деформации. Экспериментальные диаграммы деформации исследуемого сплава в координатах истинные напряже-

ния (σ) — истинные деформации (ϵ) приведены на рис. 1 и 2.

Сплошные линии черного и красного цвета соответствуют двукратным испытаниям. Кривые текучести образцов, испытанных по одинаковым температурно-скоростным режимам, совпадают с высокой точностью (различия в напряжениях не превышают 4 МПа).

Наблюдаемая зависимость напряжений текучести от температуры и скорости деформации типична для процессов горячей деформации металлических

материалов: напряжения текучести падают с повышением температуры и с понижением скорости деформации.

При скоростях деформации $0,01$, $0,1$ и 1 с^{-1} после достижения предела текучести напряжения деформирования остаются практически неизменными в силу установившегося баланса между процессами деформационного упрочнения и динамического разупрочнения (динамического возврата) (см. рис. 1).

Кривые деформации со скоростями 10 и 30 с^{-1} показывают рост напряжений текучести до пикового значения, а затем их значительное падение (см. рис. 2). Вероятной причиной этого падения напряжений является деформационный разогрев образцов, отсутствующий при низких скоростях деформации.

На диаграммах деформации со скоростью 30 с^{-1} видны осцилляции напряжений, обусловленные резонансными явлениями механической системы нагружения, типичные для высоких скоростей деформаций [10].

Поправки на деформационный разогрев образцов. Падение напряжений с ростом величины деформации со скоростями 10 и 30 с^{-1} может быть связано

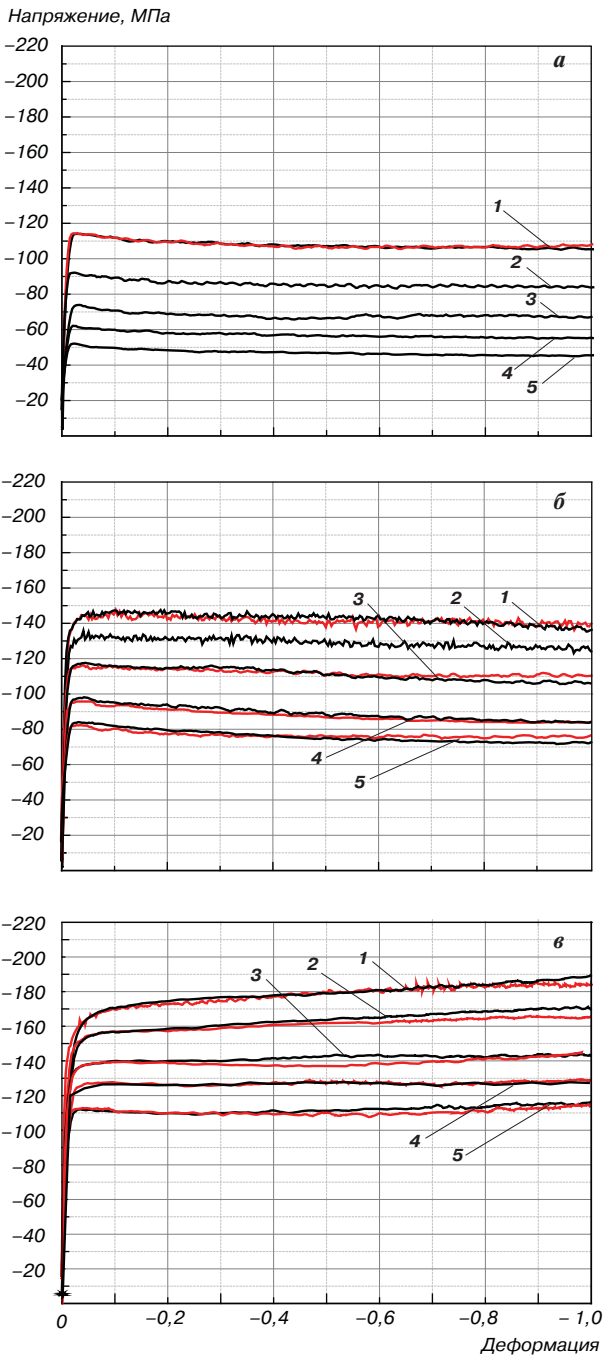


Рис. 1. Диаграммы деформации со скоростями $0,01 \text{ с}^{-1}$ (а), $0,1 \text{ с}^{-1}$ (б) и 1 с^{-1} (в). Красные линии — данные повторных испытаний: 1 — 375 °C ; 2 — 350 °C ; 3 — 400 °C ; 4 — 425 °C ; 5 — 450 °C

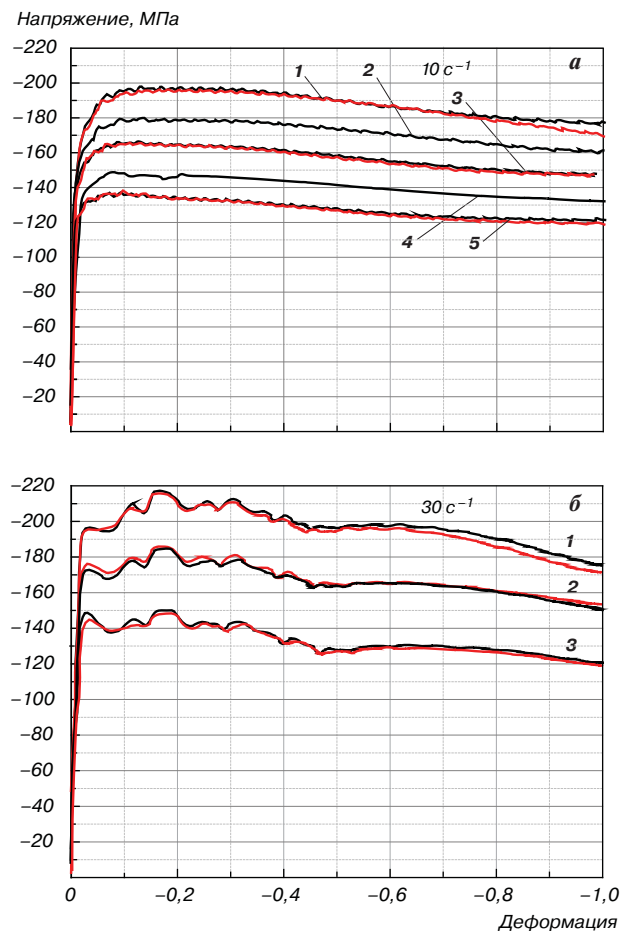


Рис. 2. Диаграммы деформации со скоростями 10 с^{-1} (а) (1 — 350 °C ; 2 — 375 °C ; 3 — 400 °C ; 4 — 425 °C ; 5 — 450 °C) и 30 с^{-1} (б) (1 — 350 °C ; 2 — 400 °C ; 3 — 450 °C). Красные линии — данные повторных испытаний

с деформационным разогревом образцов. Управляющая система комплекса Gleeble, получая сигнал от термопары, стремится поддержать заданную температуру деформации путем изменения силы тока, протекающего через образец. При скоростях деформации 0,01, 0,1 и 1 с⁻¹ управляющей системе удается обеспечить относительное постоянство температуры в процессе деформации. При скоростях деформации 10 и 30 с⁻¹ в силу интенсивного тепловыделения управляющая система отключает подачу тока в самом начале деформации. Несмотря на это, температура образца в процессе деформации значительно увеличивается. Соответственно, возникает необходимость внесения поправок в режим деформационного разогрева для приведения кривых текучести к условиям изотермической деформации.

В случаях, когда текущая температура образца непосредственно измеряется в процессе деформации,

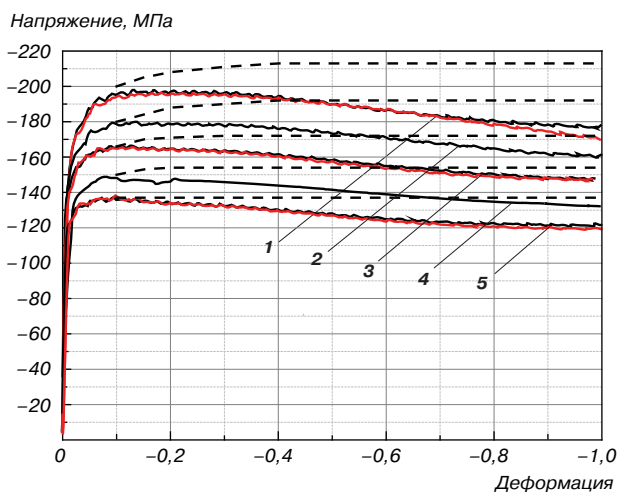


Рис. 3. Диаграммы деформации со скоростью 10 с⁻¹: исходные (сплошные линии) и приведенные к изотермическим условиям (пунктирные линии): 1 — 350 °С; 2 — 375 °С; 3 — 400 °С; 4 — 425 °С; 5 — 450 °С

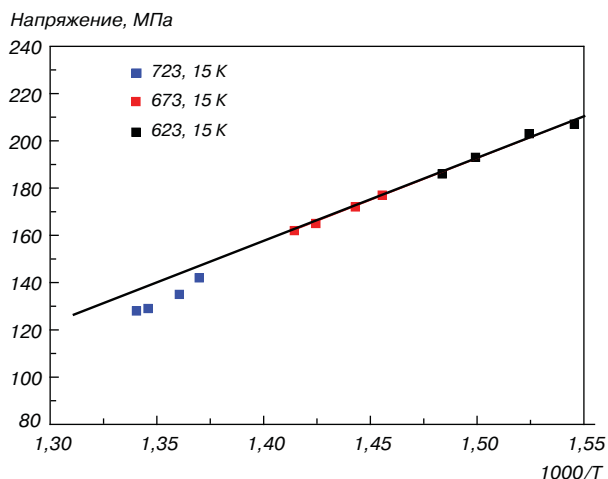


Рис. 4. Зависимость напряжений текучести от обратной величины текущей температуры образцов при деформациях 0,8; 0,6; 0,4, 0,2 (слева направо для каждой группы точек). Скорость деформации 30 с⁻¹

стандартную процедуру внесения поправок выполняли в соответствии с работой [11].

Откорректированные на деформационный разогрев диаграммы деформации со скоростью 10 с⁻¹ представлены на рис. 3 пунктирными линиями.

Аналогичный анализ для скорости деформации 30 с⁻¹ усложняется по причине значительных осцилляций напряжений (см. рис. 2). Поэтому предварительно было выполнено сглаживание осциллирующих кривых текучести полиномами четвертой степени, а затем на сглаженных кривых замерены значения напряжений текучести при тех же дискретных деформациях 0,2; 0,4; 0,6; и 0,8, а также соответствующие этим деформациям текущие температуры. Построенный по этим данным график зависимости напряжений от обратной величины текущей температуры показан на рис. 4.

Сводная информация об установившихся напряжениях текучести в условиях изотермической деформации. В таблице приведена сводная информация о значениях установившихся напряжений в условиях изотермической деформации в зависимости от температуры и скорости деформации. Для скоростей деформации 0,01–1 с⁻¹ установившиеся напряжения определены непосредственно из графиков на рис. 1 при величине деформации $\epsilon = 0,5$. Для скорости деформации 10 с⁻¹ установившиеся напряжения определены из приведенных к изотермическим условиям диаграмм деформации (см. рис. 3).

Аналитические выражения для установившихся напряжений текучести. Для выбора режимов горячей деформации полезно иметь аналитическое выражение, позволяющее оценивать напряжения текучести в зависимости от конкретных температурно-скоростных параметров деформации. В рассматриваемом случае задача упрощается, так как в изотермических условиях напряжения текучести исследуемого сплава уже при небольших деформациях выходят на установившийся уровень.

Данные о величине установившихся напряжений, представленные в таблице и на рис. 1, полностью согласуются с известными представлениями о том, что совместное влияние температуры и скорости деформирования на деформационное поведение металлических материалов описывается параметром Зинера – Холломона (1).

Используя выражение (3) для регрессионного анализа экспериментальных значений установившихся напряжений текучести (таблица), нелинейной регрессией получили следующие значения неизвестных параметров:

$$A = 3,7783 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}; \alpha = 0,0209 \text{ МПа}^{-1};$$

$$n = 3,1658; Q = 1,757 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль.} \quad (6)$$

Результаты расчета по выражению (3) с использованием параметров (6) приведены на рис. 5.

Установившиеся напряжения (МПа) в условиях изотермической деформации

Температура деформации, °С	$\dot{\epsilon} = 0,01 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 30 \text{ с}^{-1}$
350	107	142	179	213	230
375	85	128	160	192	—
400	68	108	140	172	187
425	57	88	127	154	—
450	47	76	110	137	147

Рассчитанные значения хорошо (с отклонением, не превышающим 5 %) описывают экспериментальные данные для всех скоростей и температур деформации.

Так образом, получены аналитические выражения для установившихся напряжений текучести как функции параметра Зинера – Холломона, позволяющие предсказывать сопротивление пластической деформации нового экономнолегированного сплава в широком диапазоне температур и скоростей деформации, что важно для компьютерного моделирования и выбора температурно-скоростных режимов горячей деформации.

Анализ скоростной зависимости напряжений текучести. Коэффициент скоростной зависимости напряжений текучести

$$m = \frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

является одним из факторов, определяющих пластичность материалов, так как низкие значения коэффициента m способствуют локализации деформации и снижению пластичности (особенно при отсутствии деформационного упрочнения, например на установившейся стадии деформации исследуемого сплава).

Для нахождения коэффициента m нужно строить графики зависимости напряжений от скорости деформации в двойных логарифмических осях. Так, графики на рис. 6 построены с использованием данных, приведенных в таблице.

Коэффициент скоростной зависимости напряжений текучести определяют касательные, проведенные к графикам. Легко убедиться, что коэффициент m резко падает с ростом скорости и понижением температуры деформации от 0,22 (деформация при 450 °С со скоростью 0,01 с⁻¹) до 0,07 (деформация при 350 °С со скоростью 10 с⁻¹).

Более детальные расчеты коэффициента m в широком диапазоне скоростей и температур деформации позволяют выполнить полученные аналитические выражения для установившихся напряжений. Для этого требуется:

- 1) рассчитать напряжения для заданной температуры деформации в заданном диапазоне скоростей деформации;
- 2) построить графики зависимостей логарифма напряжений от логарифма скорости деформации;

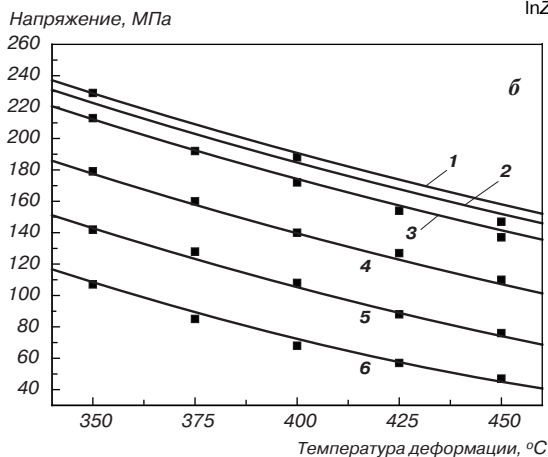
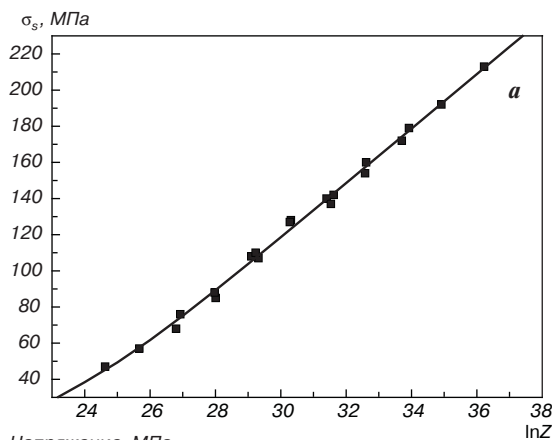


Рис. 5. Установившиеся значения напряжений: точки — экспериментальные данные; линии — расчет по выражению (3) — зависимость от величины параметра Зинера – Холломона (а); зависимость от температуры и скорости одноосной осадки (б); 1 — 30 с⁻¹; 2 — 20 с⁻¹; 3 — 10 с⁻¹; 4 — 1 с⁻¹; 5 — 0,1 с⁻¹; 6 — 0,01 с⁻¹; Q = 175,7 кДж/моль

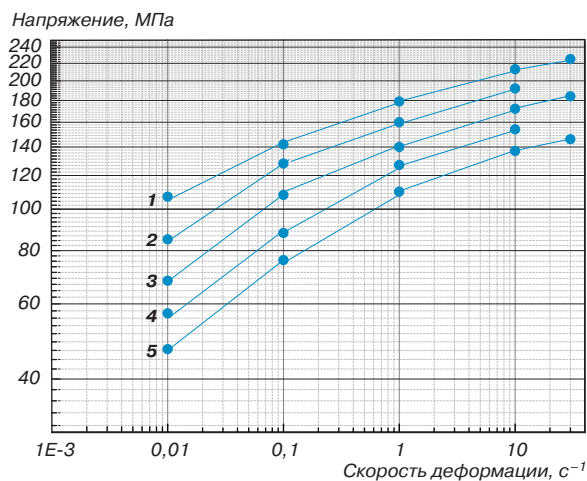


Рис. 6. Установившиеся напряжения исследуемого сплава в зависимости от температуры и скорости деформации: 1 — 350 °С; 2 — 375 °С; 3 — 400 °С; 4 — 425 °С; 5 — 450 °С

3) численным методом найти производные в каждой точке построенных графиков;

4) построить диаграммы в координатах температура деформации – скорость деформации, на которых контурными линиями обозначены уровни постоянных значений коэффициента m (рис. 7).

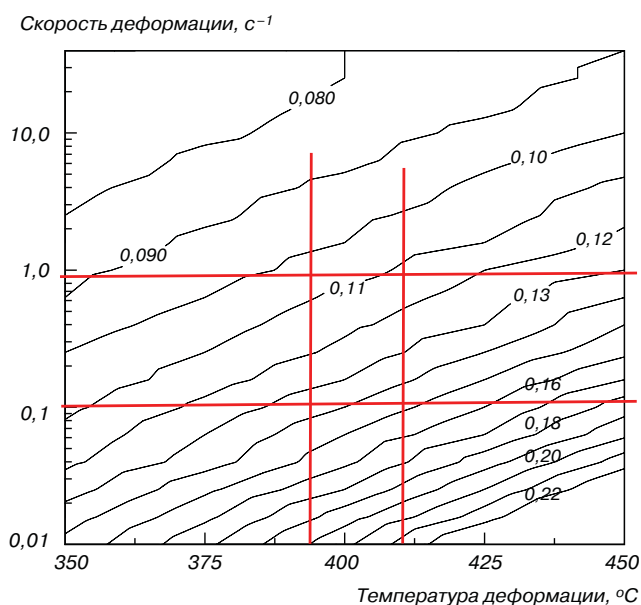


Рис. 7. Коэффициент скорости зависимости напряжений текучести от температуры и скорости деформации

Диаграмма, показанная на рис. 7, позволяет предсказать значение коэффициента скорости зависимости для заданного температурно-скоростного режима деформации.

Выводы

1. Выполнено исследование деформационного поведения экспериментального сплава P-1580, экономнолегированного скандием в условиях одноосной осадки в интервале температур 350–450 °C и в диапазоне скоростей деформации 0,01–30 с⁻¹.

2. При низких скоростях деформации (0,01–1 с⁻¹) напряжения текучести уже после небольшой деформации выходят на установившийся (постоянный) уровень, отвечающий балансу между процессами деформационного упрочнения и динамического разупрочнения (возврата). Деформация с высокими скоростями

10 и 30 с⁻¹ сопровождается деформационным разогревом образцов и падением напряжений текучести с ростом величины деформации. После внесения поправок на деформационный разогрев диаграммы деформации также приобретают вид (с горизонтальным плато), характерный для горячей деформации, контролируемой динамическим возвратом. Исключением является деформация со скоростью 30 с⁻¹ с начальной температурой 450 °C. В этом случае поправка на температурный разогрев не устраняет монотонное снижение напряжений с ростом величины деформации.

3. Получены аналитические выражения для установившихся напряжений текучести как функции параметра Зинера – Холломона, позволяющие предсказывать сопротивление пластической деформации сплава в широком диапазоне температур и скоростей деформации, что важно для компьютерного моделирования и выбора температурно-скоростных режимов горячей деформации.

4. Показано, что коэффициент скорости зависимости напряжений текучести сплава, являющийся одним из факторов, определяющих пластичность материала, резко падает с ростом скорости и понижением температуры деформации. Построена диаграмма, позволяющая предсказать значение коэффициента скорости зависимости для заданного температурно-скоростного режима деформации.

Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 03.G25.31.0265 «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al – Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филатов Ю. А. Промышленные сплавы на основе системы Al – Mg – Sc // Технология легких сплавов. 1996. № 3. С. 30–35.
2. Gorbunov J. A. The Role and Prospects of Rare-Earth Metals in the Development of Physical-Mechanical Characteristics and Applications of Deformable Aluminum Alloys // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. Vol. 8, No. 5. P. 636–645.
3. Rushchits S., Aryshenskii E., Kawalla R., Serebryany V. Investigation of Texture Structure and Mechanical Properties Evolution during Hot Deformation of 1565 Aluminum Alloy // Materials Science Forum. 2016. Vol. 854. P. 73–78. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.854.73
4. Филатов Ю. А. Деформируемые сплавы на основе системы Al – Mg – Sc и перспективы их применения в автомобилестроении // Цветные металлы. 1997. № 2. С. 60–62.
5. Бронз А. В., Ефремов В. И., Плотников А. Д., Чернявский А. Г. Сплав 1570с — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С. 62–67.
6. Баранов В. Н., Сидельников С. Б., Зенкин Е. Ю., Ворошилов Д. С. Разработка режимов получения деформированных полуфабрикатов из экспериментального скандийсодержащего алюминиевого сплава и исследование их механических свойств // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2018. № 2. С. 43–49.
7. Dovzhenko I. N., Dovzhenko N. N., Sidelnikov S. B., Konstantinov I. L. 3D modelling of the large-capacity ingots of an Al – Mg system aluminium alloy doped with scandium rolling process // Non-ferrous Metals. 2017. No. 2. P. 60–64.
8. Чурюмова А. Ю., Телешов В. В. К вопросу о количественном описании зависимости напряжения течения алюми-

ниевых сплавов на стадии установившегося течения при горячем деформировании от параметра Зенера – Холломоны // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118, № 9. С. 950–957.

9. Sellars C. M., Tegart W. J., McG. La relation entre la résistance et la structure dans la déformation à chaud // *Memories Scientifiques Rev. Métallurg.* 1966. Vol. 63. P. 731–746.

10. Chen S.-R., Wu C.-Y., Yeh Y.-L., Ou Y.-L. Hot Deformation Resistance of an AA5083 Alloy under High Strain Rates // *China Steel Technical Report.* 2014. No. 27. P. 83–88.
11. Rushchits S. V., Aryshensky E. V., Sosedkov S. M., Akhmed'yanov A. M. Modeling the Hot Deformation Behavior of 1565ch Aluminum Alloy // *Key Engineering Materials.* 2016. Vol. 684. P. 35–41.



Tsvetnye Metally. 2019. No. 9, pp. 80–86
DOI: 10.17580/tsm.2019.09.13

UNDERSTANDING THE BEHAVIOUR OF ALUMINIUM ALLOY P-1580 SPARINGLY DOPED WITH SCANDIUM UNDER HOT DEFORMATION

Information about authors

N. N. Dovzhenko, Professor at the Department of Mechanical Engineering¹, e-mail: n.dovzhenko@bk.ru
S. V. Rushchits, Professor at the Department of Materials Science and Physics and Chemistry of Materials²
I. N. Dovzhenko, Associate Professor at the Department of Metal Forming¹
P. O. Yurev, Applied Research Engineer¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Abstract

With the help of the Gleeble 3800 system, a study was carried out to understand the deformation behaviour of an experimental alloy P-1580 sparingly doped with scandium. The alloy was designed by RUSAL UC (United Company) and contains the following doping elements (hereinafter – wt%): Al – 5 Mg – 0.6 Mn – 0.10 Sc – 0.11 Zr. The process involved uniaxial upsetting in the temperature range of 350–450 °C and the deformation rate range of 0.01–30 s⁻¹. For the fixed temperatures of 350, 375, 400, 425 and 450 °C and deformation rates of 0.01, 0.1, 1, 10 and 30 s⁻¹, experimental true stress true strain curves were obtained for the alloy in view. At lower deformation rates (i.e. 0.01–1.0 s⁻¹), the flow stresses reach a steady level corresponding to the equilibrium between strain hardening and softening (i. e. recovery) even after slight deformation. Deformation at higher rates (i. e. 10 and 30 s⁻¹) leads to strain-induced heating of specimens, and as the strain rises the flow stresses drop. After the strain curves were adjusted to allow for the strain-induced heating, they started to look like curves typical of hot deformation controlled by dynamic recovery. These findings are perfectly in line with the popular belief that the combined effect of temperature and deformation rate on the deformation behaviour of metallic materials can be described with Zener-Hollomon parameter. Analytical expressions were derived for the steady flow stresses as a function of Zener-Hollomon parameter. They enable to predict plastic resistance of alloys within a wide range of temperatures and deformation rates. A curve was built that can help predict the rate coefficient as a function of a given temperature-rate regime of deformation.

Key words: aluminium alloys, physical modelling, Zener-Hollomon parameter, hot deformation, flow stress.

References

1. Filatov Yu. A. Industrial alloys of the system Al – Mg – Sc. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 1996. No. 3. pp. 30–35.
2. Gorbunov J. A. The Role and Prospects of Rare-Earth Metals in the Development of Physical-Mechanical Characteristics and Applications of Deformable Aluminum Alloys. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2015. Vol. 8, No. 5. pp. 636–645.
3. Rushchits S., Aryshenskii E., Kawalla R., Serebryany V. Investigation of Texture Structure and Mechanical Properties Evolution during Hot Deformation of 1565 Aluminum Alloy. *Materials Science Forum.* 2016. Vol. 854. pp. 73–78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.854.73
4. Filatov Yu. A. Wrought alloys of the system Al – Mg – Sc and their prospective application in car making. *Tsvetnye Metally.* 1997. No. 2. pp. 60–62.
5. Bronz A. V., Efremov V. I., Plotnikov A. D., Chernyavskiy A. G. 1570s – alloy for the tight structures of advanced reusable products made by the Rocket and Space Corporation Energiya. *Space Engineering and Technology.* 2014. No. 4 (7). pp. 62–67.
6. Baranov V. N., Sidelnikov S. B., Zenkin E. Yu., Voroshilov D. S. Developing regimes for obtaining deformed semi-finished products made of experimental scandium-containing aluminium alloy and understanding their mechanical properties. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya.* 2018. No. 2. pp. 43–49.
7. Dovzhenko I. N., Dovzhenko N. N., Sidelnikov S. B., Konstantinov I. L. 3D modelling of the large-capacity ingots of an Al – Mg system aluminium alloy doped with scandium rolling process. *Non-ferrous Metals.* 2017. No. 2. pp. 60–64.
8. Churyumova A. Yu., Teleshov V. V. On quantitative description of the relationship between the flow stress of aluminium alloys at the equilibrium flow stage during hot deformation and Zener-Hollomon parameter. *Fizika metallov i metallovedenie.* 2017. Vol. 118, No. 9. pp. 950–957.
9. Sellars C. M., Tegart W. J., McG. La relation entre la résistance et la structure dans la déformation à chaud. *Mémoires scientifiques de la Revue de métallurgie.* 1966. Vol. 63. pp. 731–746.
10. Chen S.-R., Wu C.-Y., Yeh Y.-L., Ou Y.-L. Hot Deformation Resistance of an AA5083 Alloy under High Strain Rates. *China Steel Technical Report.* 2014. No. 27. pp. 83–88.
11. Rushchits S. V., Aryshenskii E. V., Sosedkov S. M., Akhmedyanov A. M. Modeling the Hot Deformation Behavior of 1565ch Aluminum Alloy. *Key Engineering Materials.* 2016. Vol. 684. pp. 35–41.

ORE & METALS WEEKLY

ГОРНОРУДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ · УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ · МЕТАЛЛУРГИЯ

ЕЖЕНЕДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ НОВОСТНОЕ ИЗДАНИЕ

БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА:
<http://www.rudmet.ru/page/omw>

Всем клиентам предлагается оформить бесплатную подписку на продукт Издательского дома «Руда и Металлы» — еженедельное новостное электронное издание "Ore&Metals Weekly", распространяемое бесплатно в виде e-mail рассылки. Тематика издания: новости компаний горной, угольной промышленности, цветной и черной металлургии, а также проектных организаций и производителей оборудования для горно-металлургической отрасли. В издании анонсируются крупнейшие отраслевые мероприятия.



Реклама