

РАЗРАБОТКА РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ 1424 и В-1461

© 2020 г. **Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов, С.В. Сурудин, В.А. Разживин**

Самарский национальный исследовательский университет (СНИУ) им. акад. С.П. Королева, г. Самара, Россия

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СамНЦ РАН), г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 23.04.20 г., доработана 30.06.20 г., подписана в печать 03.07.20 г.

Аннотация: Предложен вариант реологической модели горячей деформации – закона гиперболического синуса, учитывающий в отличие от стандартного не только скорость деформации и температуру процесса, но и степень деформации. Входящие в закон гиперболического синуса константы материала заменены полиномиальными функциями степени деформации, для расчета коэффициентов которых разработана соответствующая методика. Показано применение предложенной реологической модели для алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности марки 1424 системы Al–Mg–Li–Zn и В-1461 системы Al–Cu–Li–Zn, для которых методом физического моделирования на установке Gleeble-3800 экспериментально определены кривые течения в диапазонах температур 400–480 °С и скоростей деформации 1–60 с^{–1} до степени деформации 0,6. Исследовалось также влияние исходного состояния материала – образцы отбирались как от слитка, так и от горячекатаных плит. Определены константы реологической модели горячего деформирования, включающей параметр Зинера–Холломоуна и закон гиперболического синуса для всего диапазона напряжений и деформаций. После аппроксимации зависимостей параметров данной модели от истинных деформаций полиномиальным законом 4-го порядка создана реологическая модель, описывающая поведение сплава в исследуемом температурно-скоростном диапазоне. Установлены особенности изменения параметров закона гиперболического синуса от степени деформации. Показано, что параметры для литого материала выше, чем для катаного. Сравнение стандартной и предложенной моделей показало, что использование стандартной модели во всем интервале деформаций приводит к завышенным значениям напряжений течения (до 12 %).

Ключевые слова: реологическая модель, физическое моделирование, сплав 1424, сплав В-1461, напряжения течения, горячая деформация, степень деформации, скорость деформации, температура, параметр Зинера–Холломоуна.

Гречников Ф.В. – докт. техн. наук, акад. РАН, зав. кафедрой обработки металлов давлением (ОМД) СНИУ им. акад. С.П. Королева (443086, г. Самара, ул. Луначева, 47); гл. науч. сотрудник СамНЦ РАН (443001, г. Самара, Студенческий пер., 3А). E-mail: gretch@ssau.ru.

Ерисов Я.А. – докт. техн. наук, доцент кафедры ОМД СНИУ им. акад. С.П. Королева. E-mail: yaraslav.erisov@mail.ru.

Сурудин С.В. – канд. техн. наук, инженер кафедры ОМД СНИУ им. акад. С.П. Королева. E-mail: innosam63@gmail.com.

Разживин В.А. – аспирант, инженер кафедры ОМД СНИУ им. акад. С.П. Королева. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru.

Для цитирования: Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Разживин В.А. Разработка реологической модели горячей деформации на примере алюминий-литиевых сплавов 1424 и В-1461. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 6. С. 44–51. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-32-44-51.

Development of hot deformation rheological model as exemplified by 1424 and V-1461 aluminum-lithium alloys

F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov, S.V. Surudin, V.A. Razzhivin

Samara National Research University named after acad. S.P. Koroleva (SNRU), Samara, Russia

Samara Federal Center of Russian Academy of Science, Samara, Russia

Received 23.04.2020, revised 30.06.2020, accepted for publication 03.07.2020

Abstract: The article proposes a variant of the rheological model of hot deformation – the law of hyperbolic sine, which, in contrast to the standard one, takes into account not only the strain rate and process temperature, but also the strain ratio. Material constants included in the law of hyperbolic sine are replaced by polynomial functions of the strain ratio with coefficients calculated using the corresponding method developed.

The paper describes applications of the rheological model proposed in low-density aluminum-lithium alloys 1424 of the Al–Mg–Li–Zn system and V-1461 of the Al–Cu–Li–Zn system, for which flow curves in the temperature range 400–480 °C and strain rate range 1–60 s⁻¹ up to a strain ratio of 0.6 are defined by physical simulation at the Gleeble 3800 unit. The influence of the initial material state was also investigated – samples were taken from both the ingot and hot-rolled plates. Constants were determined for the rheological model of hot deformation including the Zener–Hollomon parameter and the law of hyperbolic sine for the entire range of stresses and strains. After approximating the dependences of the model parameters on true strains with a 4th degree polynomial law, a rheological model was created that describes the alloy behavior in the temperature-rate range under study. The features of changes in hyperbolic sine law parameters depending on the strain ratio were established. It was shown that, in general, parameters for the cast material are higher than for the rolled one. A comparison between the standard and proposed models showed that the use of the standard model over the entire strain interval leads to too high flow stress values (up to 12 %).

Keywords: rheological model, physical modeling, 1424 alloy, V-1461 alloy, flow stresses, hot deformation, strain ratio, strain rate, temperature, Zener–Hollomon parameter.

Grechnikov F.V. – Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of metal forming, Samara National Research University named after acad. S.P. Koroleva (SNRU) (443086, Russia, Samara, Lukacheva str. 47). Chief researcher of Samara Federal Center of Russian Academy of Science (443001, Russia, Samara, Studencheskij per., 3A). E-mail: gretch@ssau.ru.

Erisov Ya.A. – Dr. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of metal forming, SNRU. E-mail: yarovslav.erisov@mail.ru.

Surudin S.V. – Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Department of metal forming, SNRU. Email: innosam63@gmail.com.

Razzhivin V.A. – Graduate student, Engineer, Department of metal forming, SNRU. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru.

For citation: Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Razzhivin V.A. Development of hot deformation rheological model as exemplified by 1424 and V-1461 aluminum-lithium alloys. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 6. P. 44–51 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-32-44-51.

Введение

Развитие авиационной и ракетно-космической техники неразрывно связано с задачей снижения массы летальных аппаратов, одним из решений которой является использование алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности [1–6]. Первое поколение этих материалов не нашло широкого применения из-за низких характеристик пластичности и технологичности при изготовлении полуфабрикатов и деталей. Данные недостатки устранены в новых сплавах систем Al–Mg–Li, Al–Cu–Li и Al–Mg–Cu–Li, которые отличаются от первого поколения пониженным содержанием лития и дополнительным легированием Sc, Zn, Mn, Ag [4–6].

Алюминий-литиевые сплавы с пониженной плотностью марок 1424 (2,54 г/см³) системы Al–Mg–Li–Zn и В-1461 (2,63 г/см³) системы Al–Cu–Li–Zn, характеризующиеся повышенными значениями вязкости разрушения и трещиностойкости по сравнению с ранее разработанными аналогами 1420 и 1460, рассматриваются в качестве альтернативы сплавам 1163-Т и В950сТ2 соответственно [6–8].

Практически все публикации, посвященные сплавам 1424 и В-1461, связаны с разработкой режимов их термомеханической обработки и упрочняющей термической обработки, направленных

на получение регламентированной структуры, обеспечивающей уменьшение анизотропии механических свойств и повышение их стабильности [6–14]. При этом такой важный вопрос, как влияние температурно-скоростных режимов на сопротивление деформации сплавов 1424 и В-1461, мало изучен [15].

Наиболее часто для описания зависимости между напряжениями течения (σ), скоростью деформации ($\dot{\epsilon}$) и абсолютной температурой (T) используются реологические модели [16–19], каждая из которых применима к определенному интервалу изменения σ :

$$\dot{\epsilon} = A' \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A'' \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (3)$$

где α , β , A и n – константы материала; Q – энергия активации процесса горячей деформации; $R = 8,31$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ – газовая постоянная.

Степенной (1) и экспоненциальной (2) законы применимы для низких ($\alpha\sigma < 0,8$) и высоких

($\alpha\sigma > 0,8$) напряжений соответственно. Закон гиперболического синуса (3) может быть использован в широком диапазоне скоростей и температур деформации.

Напряжения течения по закону гиперболического синуса определяются выражением [19]

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1} \right], \quad (4)$$

где Z — параметр Зинера—Холломона, описывающий совместное влияние температуры и скорости деформации на пластическое течение металлических материалов:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right). \quad (5)$$

Чем ниже параметр Z (маленькие скорости деформации и/или большие температуры), тем меньше напряжения течения, и наоборот.

Таким образом, для построения модели пластического течения материала необходимо на основании кривых деформирования определить энергию активации Q , фактор α и показатель n .

Реологические модели (1)—(3) не учитывают степень деформации, что может быть критическим для некоторых процессов обработки металлов давлением и ряда обрабатываемых материалов, в частности алюминий-литиевых сплавов, у которых напряжения течения быстро увеличиваются, достигая максимального значения, а затем плавно уменьшаются с ростом степени деформации, т.е. скорость разупрочнения превышает скорость деформационного упрочнения. Падение напряжений обычно обусловлено протеканием процессов динамического возврата и динамической рекристаллизации [10, 14, 17—20].

В связи с этим цель настоящей работы состояла в разработке реологической модели горячей деформации алюминий-литиевых сплавов марок 1424 и В-1461, учитывающей не только скорость деформации и температуру процесса, но и степень деформации.

Методика исследований

Заменим входящие в закон гиперболического синуса (4) константы материала α , β , A и n соответствующими функциями от степени деформации. В этом случае получим следующую реологическую модель, учитывающую степень деформации:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1} \right], \\ Z &= \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \\ Q &= f_1(\epsilon), \\ \ln A &= f_2(\epsilon), \\ n &= f_3(\epsilon), \\ \alpha &= f_4(\epsilon), \end{aligned} \quad (6)$$

где $f(\epsilon)$ — функции параметров модели гиперболического синуса от степени деформации.

Для того чтобы оценить вид $f(\epsilon)$, необходимо во всей области определения кривой деформирования с заданным шагом для каждой степени деформации рассчитать параметры модели гиперболического синуса, а затем методом регрессионного анализа вычислить параметры зависимости $f(\epsilon)$.

Методика определения параметров реологической модели, учитывающей температуру, скорость и степень деформации, имеет следующий вид.

1. Определение по кривым сопротивления деформации значений напряжений течения при конкретных скорости и степени деформации, а также температуры.

2. Определение параметров модели гиперболического синуса при конкретной степени деформации.

2.1. Определение параметров степенного (1) и экспоненциального (2) законов n' и β по тангенсу угла наклона прямых $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ и $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$, используя уравнения

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A' + n' \ln \sigma - \frac{Q}{RT}, \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A'' + \beta \sigma - \frac{Q}{RT}. \quad (8)$$

2.2. Определение параметра α по формуле

$$\alpha \approx \beta/n, \quad (9)$$

где в первом приближении $n \approx n'$.

2.3. Уточнение значения показателя n , исходя из тангенса угла наклона прямой $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)]$, по уравнению

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT}. \quad (10)$$

2.4. Определение погрешности расчета параметра n :

$$\Delta = \frac{|n - n'|}{n} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

2.5. Если погрешность Δ превышает требуемую точность расчетов, то возврат к п. 2.2.

2.6. Определение энергии активации Q , исходя из тангенса угла наклона прямой $\ln[\text{sh}(\alpha\sigma)] - 1/T$, по уравнению

$$Q = R \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)]} \bigg|_T \frac{\partial \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \bigg|_{\dot{\epsilon}}. \quad (12)$$

2.7. Уточнение значения n , исходя из тангенса угла наклона прямой $\ln Z - \ln[\text{sh}(\alpha\sigma)]$, по уравнению

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)]. \quad (13)$$

2.8. Определение погрешности расчета параметра n по уравнению (11).

2.9. Если погрешность Δ превышает требуемую точность расчетов, то возврат к п. 2.2.

2.10. Определение параметра A по точке пересечения зависимости $\ln Z - \ln[\text{sh}(\alpha\sigma)]$ с осью ординат по формуле

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\text{sh}(\alpha\sigma)]. \quad (14)$$

3. Переход к следующему значению степени деформации — возврат к п. 2.

Предложенная модель (6) и методика определения ее параметров реализована на примере алюминий-литиевых сплавов 1424 (состав, мас. %: 5,1 Mg, 1,7 Li, 0,5 Zn, 0,06 Zr и 0,07 Sc) и В-1461 (2,8 Cu, 1,7 Li, 0,5 Zn, 0,09 Zr и 0,06 Sc).

Физическое моделирование процесса горячей деформации осуществляли путем одноосного сжатия цилиндрических образцов высотой 15 мм и диаметром 10 мм на установке Gleeble-3800. Для проведения испытаний на одноосное сжатие при высоких скоростях деформации применяли модуль Hydrawedge.

Исследования проводились на образцах, отобранных от слитка и горячекатаной плиты из сплава В-1461. Плиты толщиной 55 мм получены из слитков сечением 300×1100 мм с использованием продольно-поперечной горячей прокатки и поставлены в состаренном состоянии. Нагрев под закалку осуществлялся при температуре 530 °С с последующим охлаждением в холодной воде и правкой растяжением с остаточной степенью деформации 2,8 %. Старение производилось по трехступенчатому режиму. Так же исследова-

лись образцы из сплава 1424, которые были вырезаны из плит толщиной 20 мм, полученных из слитков сечением 300×1100 мм продольно-поперечной горячей прокаткой с одного нагрева. После прокатки осуществлялась закалка с 500 °С с охлаждением на воздухе, а затем — правка растяжением с остаточной степенью деформации 2 % [21, 22].

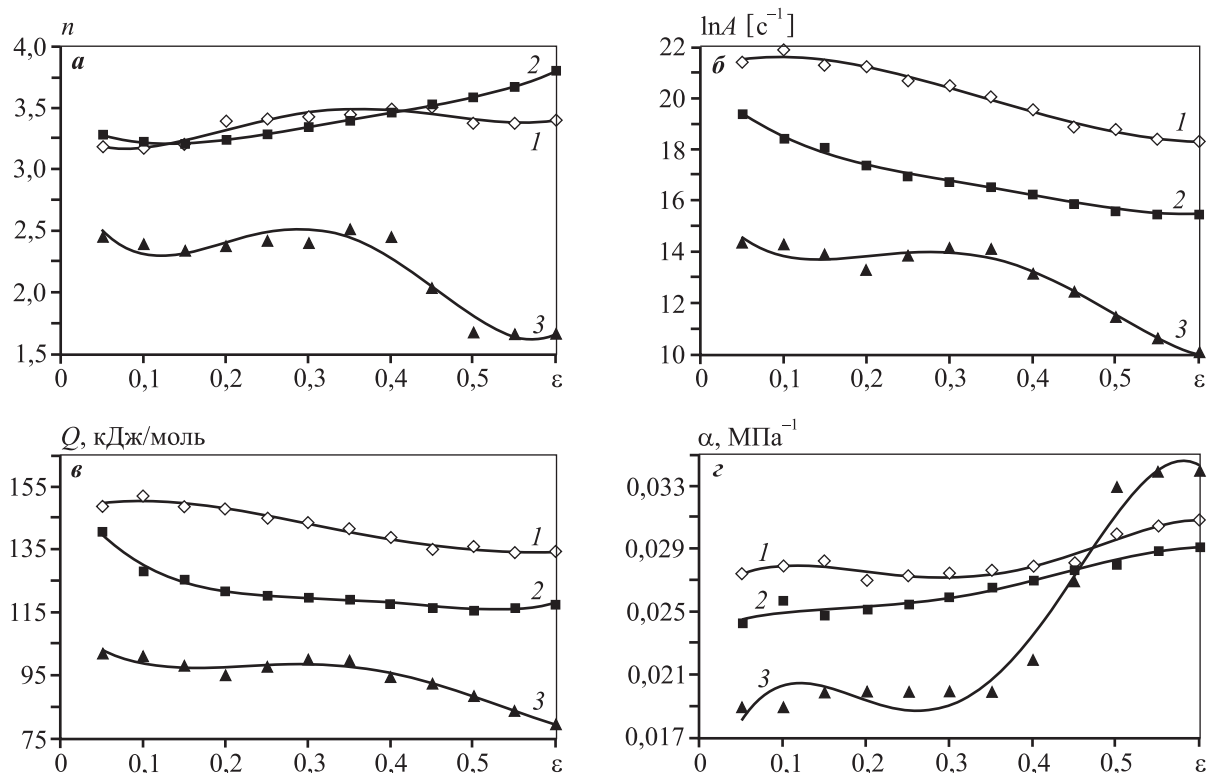
Диапазон скоростей деформации ($\dot{\epsilon} = 1 \div 60 \text{ с}^{-1}$) при испытании подбирался таким образом, чтобы перекрыть все процессы обработки давлением, применяемые при изготовлении полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов В-1461 и 1424 [23–29]. Исходя из анализа работ [30, 31] были подобраны температурные условия деформирования — 400÷480 °С, соответствующие процессам горячей деформации сплавов 1424 и В-1461.

При физическом моделировании образцы нагревались прямым пропусканием тока до температуры испытания со скоростью 5 °С/с и выдерживались при ней 5 мин для выравнивания температуры по сечению и длине образца, а также для растворения упрочняющих фаз, выделившихся при старении. Логарифмическая степень деформации составляла 0,6. После окончания испытания следовало ускоренное охлаждение водой.

Для определения параметров разработанной реологической модели (6) кривые сопротивления деформации, полученные при физическом моделировании, были разбиты на интервалы по степени деформации с шагом 0,05. Параметры реологической модели гиперболического синуса были рассчитаны для каждой степени деформации, используя указанную выше методику.

Результаты и их обсуждение

Зависимость параметров модели гиперболического синуса от степени деформации показана на рисунке. Для обоих сплавов независимо от исходного состояния характерно снижение энергии активации Q и параметра A с ростом степени деформации. Фактор α ведет себя противоположным образом — увеличивается с ростом величины ϵ . При этом для сплава 1424 данные параметры практически не изменяются до степени деформации 0,3–0,4, при достижении которой происходит их резкое увеличение (α) или уменьшение (A , Q),



Зависимость параметров реологической модели гиперболического синуса от степени деформации

1 – сплав В-1461 (литые образцы); 2 – сплав В-1461 (катаные образцы); 3 – сплав 1424 (катаные образцы)

Dependence of hyperbolic sine rheological model parameters on strain ratio

1 – V-1461 alloy (cast samples); 2 – V-1461 alloy (rolled samples); 3 – 1424 alloy (rolled samples)

что очевидно объясняется началом интенсивного разупрочнения вследствие протекания процессов возврата и рекристаллизации. Это подтверждается и тем, что у сплава 1424 параметр n при $\epsilon \geq 0,3 \div 0,4$ начинает резко уменьшаться, а для сплава В-1461 он увеличивается во всем интервале деформаций, но для литых образцов не так интенсивно, особенно при $\epsilon > 0,3 \div 0,4$.

В целом значения параметров модели гиперболического синуса литого материала в большинстве случаев превышают соответствующие значения катаного материала.

Зависимость параметров реологической модели гиперболического синуса от степени деформации аппроксимировалась полиномиальным законом 4-го порядка, который был выбран, исходя из минимизации погрешности расчетов и повышения коэффициента детерминации R^2 . Во всех случаях величина достоверности аппроксимации R^2 находилась в диапазоне 0,914–0,99, что говорит об ее высокой точности.

Тогда модель (6) примет следующий вид:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1} \right],$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \quad (15)$$

$$Q = B_0 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4,$$

$$\ln A = C_0 + C_1\epsilon + C_2\epsilon^2 + C_3\epsilon^3 + C_4\epsilon^4,$$

$$n = D_0 + D_1\epsilon + D_2\epsilon^2 + D_3\epsilon^3 + D_4\epsilon^4,$$

$$\alpha = E_0 + E_1\epsilon + E_2\epsilon^2 + E_3\epsilon^3 + E_4\epsilon^4.$$

Используя предложенную выше методику, определены параметры реологической модели гиперболического синуса для сплавов В-1461 и 1424 в зависимости от степени деформации (табл. 1).

Для сравнения в табл. 2 приведены параметры закона гиперболического синуса (4), не учитывающего степень деформации. Они рассчитаны для пиковых напряжений, возникающих при

Таблица 1. Коэффициенты полиномиальных функций, описывающих зависимость параметров реологической модели гиперболического синуса от степени деформации

Table 1. Coefficients of polynomial functions describing the dependence of hyperbolic sine rheological model parameters on strain ratio

$Q = f_1(\epsilon)$, кДж/моль	$\ln A = f_2(\epsilon)$ [с ⁻¹]	$n = f_3(\epsilon)$	$\alpha = f_4(\epsilon)$, МПа ⁻¹
Сплав В-1461 (литые образцы)			
$B_0 = 146,3$	$C_0 = 21,18$	$D_0 = 3,285$	$E_0 = 0,026$
$B_1 = 82,27$	$C_1 = 9,8$	$D_1 = -3,45$	$E_1 = 0,04$
$B_2 = 517,4$	$C_2 = -61,03$	$D_2 = 30,93$	$E_2 = -0,279$
$B_3 = 804,7$	$C_3 = 73,20$	$D_3 = -75,18$	$E_3 = 0,671$
$B_4 = -380,4$	$C_4 = -19,93$	$D_4 = 56,21$	$E_4 = -0,493$
Сплав В-1461 (катаные образцы)			
$B_0 = 155,6$	$C_0 = 20,76$	$D_0 = 3,407$	$E_0 = 0,024$
$B_1 = -392,2$	$C_1 = -31,26$	$D_1 = -3,612$	$E_1 = 0,019$
$B_2 = 1644$	$C_2 = 108$	$D_2 = 20,78$	$E_2 = -0,107$
$B_3 = -3087$	$C_3 = -200,4$	$D_3 = -40,17$	$E_3 = 0,293$
$B_4 = 2101$	$C_4 = 137,9$	$D_4 = 28,93$	$E_4 = -0,237$
Сплав 1424 (катаные образцы)			
$B_0 = 111,3$	$C_0 = 16,23$	$D_0 = 3,033$	$E_0 = 0,012$
$B_1 = -224$	$C_1 = -44,81$	$D_1 = -14,98$	$E_1 = 0,179$
$B_2 = 1237$	$C_2 = 271,8$	$D_2 = 100,7$	$E_2 = -1,237$
$B_3 = -2631$	$C_3 = -623,2$	$D_3 = -244,5$	$E_3 = 3,129$
$B_4 = 1739$	$C_4 = 443$	$D_4 = 186,3$	$E_4 = -2,435$

Таблица 2. Параметры реологической модели гиперболического синуса, учитывающей только скорость деформации и температуру

Table 2. Parameters of hyperbolic sine rheological model taking into account strain rate and temperature only

Сплав	$\ln A$ [с ⁻¹]	α , МПа ⁻¹	n	Q , кДж/моль
В-1461 (литые образцы)	19,45	0,025	3,19	133,71
В-1461 (катаные образцы)	17,67	0,026	3,28	124,49
1424 (катаные образцы)	14,02	0,023	1,96	101,04

осадке образцов. Использование данной модели на всем интервале деформаций приводит к завышенным значениям напряжения течения (до 12 %).

Заключение

В ходе экспериментального изучения деформационного поведения алюминий-литиевых сплавов В-1461 и 1424 в условиях горячей деформации в диапазоне температур 400—480 °С и скоростей деформации 1—60 с⁻¹ определены константы реологической модели горячего деформирования, включающей параметр Зинера—Холломоны и закон гиперболического синуса для всего диапазона напряжений и деформаций.

После аппроксимации зависимостей параметров данной модели от истинных деформаций полиномиальным законом 4-го порядка создана реологическая модель, достаточно точно описывающая поведение сплава в исследуемом температурно-скоростном диапазоне при степени истинной деформации до 0,6 включительно.

Работа выполнена в рамках госзадания по проекту FSSS-2020-0016.

Acknowledgments: The study was conducted as part of the government science task under Project FSSS-2020-0016.

Литература/References

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники. Вестник РАН. 2012. Т. 82. No. 6. С. 158—167.
Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aircraft engineering. Vestnik RAN. 2012. Vol. 82. No. 6. P. 158—167 (In Russ.).
2. Хохлатова Л.В., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминий-литиевые сплавы для самолетостроения. Металлург. 2012. No. 56(5-6). С. 31—35.
Khokhlatova L.V., Kolobnev N.I., Oglokov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-lithium alloys for the aircraft. Metallurg. 2012. No. 56 (5-6). P. 31—35 (In Russ.).
3. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств. Заготовит. пр-ва в машиностроении. 2009. No. 3. С. 27—41.
Gureeva M.A., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V. Welded aluminium alloys in the construction of vehicles. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyenii. 2009. No. 3. P. 27—41 (In Russ.).

4. *Rioja R., Liu J.* The evolution of Al—Li base products for aerospace and space applications. *Met. Mater. Trans. A*. 2012. Vol. 43. P. 3325—3337.
5. *Елагин В.И., Захаров В.В.* Современные Al—Li-сплавы и перспективы их развития. *МТМ*. 2013. No. 4. С. 17—23.
Elagin V.I., Zakharov V.V. Modern Al—Li alloys and prospects of their development. *Metal Sci. Heat Treat*. 2013. Vol. 55. P. 184—190.
6. *Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В.* Перспективные алюминиевые сплавы для самолетных конструкций. *Технология легких сплавов*. 2007. No. 2. С. 35—38.
Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Antipov V.V. Promising aluminum alloys for aircraft structures. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007. No. 2. P. 35—38 (In Russ.).
7. *Фридляндер И.Н.* Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970—2000 и 2001—2015 гг. *МТМ*. 2001. No. 1. С. 5—9.
Fridlyander I.N. Aluminum alloys in aircraft in the periods of 1970—2000 and 2001—2015. *Met. Sci. Heat Treat*. 2001. Vol. 43. P. 6—10.
8. *Фридляндер И.Н., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Рендикс К., Темпус Г.* Развитие термически стабильного алюминиево-литиевого сплава 1424 для применения в сварном фюзеляже. *МТМ*. 2002. No. 1. С. 3—7.
Fridlyander I.N., Hohlatova L.B., Kolobnev N.I., Rendiks K., Tempus G. Thermally stable aluminum-lithium alloy 1424 for application in welded fuselage. *Met. Sci. Heat Treat*. 2002. Vol. 44. P. 3—8.
9. *Сетюков О.А., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С.* Влияние кристаллографических ориентировок на свойства плит из Al—Li сплавов В-1461 и 1424. *Технология легких сплавов*. 2010. No. 1. С. 100—106.
Setyukov O.A., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Oglodkov M.S. Influence of crystallographic orientations on the properties of plates of Al—Li alloys V-1461 and 1424. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010. No. 1. P. 100—106 (In Russ.).
10. *Милевская Т.В., Рушиц С.В., Ткаченко Е.А., Антонов С.М.* Деформационное поведение высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях горячей деформации. *Авиационные материалы и технологии*. 2015. No. 2 (35). С. 3—9.
Milevskaya T.V., Rushits S.V., Tkachenko E.A., Antonov S.M. Deformation behavior of high-strength aluminum alloys under conditions of hot deformation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2015. No. 2 (35). P. 3—9 (In Russ.).
11. *Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Лукина Е.А., Бер Л.Б.* Снижение анизотропии в листах Al—Mg—Li—Zn-сплава 1424. *Цветные металлы*. 2013. No. 3 (843). С. 78—81.
Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Lukina E.A., Ber L.B. Reduction of anisotropy in the sheets, made of the Al—Mg—Li—Zn-alloy 1424. *Tsvetnyye metally*. 2013. No. 3. P. 78—81 (In Russ.).
12. *Фридляндер И.Н., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А., Колесникова О.К.* Конструкционный сплав 1424 пониженной плотности системы Al—Mg—Li—Zr—Sc для сварных и клепаных конструкций авиакосмической техники. *Технология легких сплавов*. 2002. No. 4. С. 20—23.
Fridlyander I.N., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A., Lukina E.A., Kolesnikova O.K. Constructional alloy 1424 of reduced density of the Al—Mg—Li—Zr—Sc system for welded and riveted structures of aerospace engineering. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2002. No. 4. P. 20—23 (In Russ.).
13. *Хохлатова Л.Б., Лукин В.И., Колобнев Н.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Кошкин В.В., Мезенцева Е.А.* Перспективный алюминий-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций изделий авиакосмической техники. *Сварочное пр-во*. 2009. No. 3. С. 7—10.
Khokhlatova L.B., Lukin V.I., Kolobnev N.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Lavpenchuk V.P., Koshkin V.V., Mezentseva E.A. Prospective aluminum-lithium alloy 1424 for welded structures of aerospace products. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2009. No. 3. P. 7—10 (In Russ.).
14. *Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Оглодков М.С.* Влияние режимов изготовления листов из сплава В-1461 на кристаллографию структуры и анизотропию свойств. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. No. 6. С. 36—42.
Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Oglodkov M.S. The influence of fabrication modes of sheets of V-1461 alloy on the structure crystallography and anisotropy of properties. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. P. 19—24.
15. *Ерисов Я.А., Гречников Ф.В.* Физическое моделирование горячей прокатки сплава пониженной плотности системы Al—Mg—Li—Zr—Zn—Sc. *Металлург*. 2017. No. 9. С. 103—108.
Erisov Ya.A., Grechnikov F.V. Physical modelling of hot rolling for low-density alloy of the Al—Mg—Li—Zr—Zn—Sc system. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. Iss. 9-10. P. 822—829.
16. *Longzhou M., Jianzhong C., Xiaobo Z.A.* Study on improving the cold-forming property of Al—Mg—Li alloy 01420. *Adv. Perf. Mater.* 1997. Vol. 4. P. 105—114.
17. *Chen Y., Li J., Lu H., Li S., Zheng Z., Zhang Y., Zhang X.* Hot deformation behavior of Al—Cu—Li—Mg—Zr alloy containing Zn and Mn. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2007. Vol. 17. P. s271—s275.

18. Ou, L., Nie Y., Zheng Z. Strain compensation of the constitutive equation for high temperature flow stress of Al—Cu—Li alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014. Vol. 23(1). P. 25—30.
19. Yu X., Zhang Y., Yin D., Yu Z., Li S. Characterization of hot deformation behavior of a novel Al—Cu—Li alloy using processing maps. *Acta Metal. Sin. (Eng. Lett.)*. 2015. Vol. 28(7). P. 817—825.
20. Erisov Ya., Surudin S., Grechnikov F. Hot deformation behavior of Al—Cu—Li—Mg—Zn—Zr—Sc alloy in as-cast and hot-rolled condition. *Mater. Sci. Forum.* 2018. Vol. 920. P. 244—249.
21. Mirzadeh H., Cabrera J.C., Najafizadeh A. Constitutive relationships for hot deformation of austenite. *Acta Mater.* 2011. Vol. 59. P. 6441—6448.
22. McQueen H.J., Ryan N.D. Constitutive analysis in hot working. *Mater. Sci. Eng. A*. 2002. Vol. 322. P. 43—63.
23. Колобнев Н.И., Сетюков О.А., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Влияние кристаллографических ориентировок на свойства плит из Al—Li сплавов В-1461 и 1424. *Технология легких сплавов*. 2010. No. 1. С. 100—106.
Kolobnev N.I., Setyukov O.A., Khokhlatova L.B., Oglochkov M.S. The influence of crystallographic orientations on the properties of plates of Al—Li alloys B-1461 and 1424. *Tekhnologiya legkikh splovov*. 2010. No.1. P. 100—106 (In Russ.).
24. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Закономерности формирования основных упрочняющих фаз в сплавах 1424 системы Al—Mg—Li—Zn и В-1461 системы Al—Cu—Li—Zn—Mg. *MuTOM*. 2013. No. 9. С. 12—17.
Lukina E.A., Alekseev A.A., Khokhlatova L.B., Oglochkov M.S. Regular features of formation of main hardening phases in alloys 1424 of the Al—Mg—Li—Zn system and V-1461 of the Al—Cu—Li—Zn—Mg system. *Met. Sci. Heat Treat.* 2014. Vol. 55(9-10). P. 466—471.
25. Колобнев Н.И., Антипов В.В., Махсидов В.В., Рябов Д.К., Хохлатова Л.Б., Попов В.И., Оглодков М.С. Способ изготовления листов из алюминиевых сплавов Пат. 2486274 (РФ). Заявл. 17.10.2011. Оpubл. 27.06.2013. Бюл. No.18.
Kolobnev N.I., Antipov V.V., Makhsidov V.V., Ryabov D.K., Khokhlatova L.B., Popov V.I., Oglochkov M.S. A method of manufacturing sheets of aluminum alloys: Pat. 2486274 (RF). Declared 10/17/2011. Publ. 06/27/2013. Bull. No. 18 (In Russ.).
26. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие Al—Li сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки. *MuTOM*. 2013. No. 9. С. 5—11.
Antipov V.V., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B. Advancement of Al—Li alloys and of multistage modes of their heat treatment. *Met. Sci. Heat Treat.* 2014. Vol. 55(9-10). P. 459—465.
27. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. высокопрочные сплавы системы Al—Cu—Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций. *Цветные металлы*. 2013. No. 9. С. 66—71.
Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Oglochkov M.S. Klochkova Yu.Yu. High-strength Al—Cu—Li alloys with increased fracture toughness intended for aircraft structures. *Tsvetnye Metally*. 2013. Iss. 9. P. 66—71 (In Russ.).
28. Тарасов Ю.М., Вахромов Р.О. применение алюминиевых сплавов, разработанных под руководством академика И.Н. Фридляндера, в отечественной авиационной технике. *Цветные металлы*. 2013. No. 9. С. 37—39.
Tarasov Yu.M., Vakhromov R.O. Application of aluminium alloys, developed under the guidance of academician I.N. Friedlander, in Russian aviation engineering, in Russian aviation engineering. *Tsvetnye Metally*. 2013. No. 9. P. 37—39 (In Russ.).
29. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Лукина Е.А., Сбитнева С.В. Изменение фазового состава в зависимости от режимов старения и структуры полуфабрикатов сплава В-1461. *MuTOM*. 2012. No. 6. С. 20—24.
Khokhlatova, L.B., Kolobnev N.I., Oglochkov M.S., Lukina E.A., Sbitneva S.V. Change in phase composition in relation to aging regimes and alloy V-1461 semifinished product structure. *Met. Sci. Heat Treat.* 2012. Vol. 54(5-6). P. 285—289.
30. Семенов Е.И. Ковка и штамповка: Справочник. Т. 2. Горячая штамповка. М.: Машиностроение, 1986.
Semenov E.I. Forging and stamping: Reference. Vol. 2. Hot stamping. Moscow: Mashinostroyeniye, 1986 (In Russ.).
31. Семенов Е.И. Ковка и штамповка: Справочник. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. М.: Машиностроение, 1985.
Semenov E.I. Forging and stamping: Reference. Vol. 1. Materials and heating. Equipment. Forging. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985 (In Russ.).