

Научная статья

УДК 621.7.011

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33

ПОСТРОЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1163 ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

А.С. Шпагин¹, А.Р. Баженов¹, К.В. Антипов¹, Ю.С. Оглодкова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. *Описан процесс создания реологической модели алюминиевого сплава 1163, предназначенной для использования в программных комплексах для моделирования процессов обработки металлов давлением. Экспериментальным путем получены зависимости напряжения течения сплава от температуры и скорости деформации. По эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля рассчитаны коэффициенты, определяющие зависимость напряжения течения от термомеханических параметров. Полученная модель обеспечивает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных.*

Ключевые слова: *деформируемые алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование, реологические свойства, напряжение течения, реологическая модель Хензеля–Шпиттеля*

Для цитирования: Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Построение реологической модели деформируемого алюминиевого сплава 1163 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

Scientific article

CONSTRUCTION OF A RHEOLOGICAL MODEL OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOY 1163 FOR COMPUTER SIMULATION OF METAL PRESSURE PROCESSES

A.S. Shpagin¹, A.R. Bazhenov¹, K.V. Antipov¹, Yu.S. Oglochkova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. *The paper describes the process of creating a rheological model of aluminum alloy 1163, intended for use in software packages for modeling metal forming processes. The flow stress curves of the alloy depending on the temperature and strain rate were obtained experimentally. Using the empirical Hensel-Spittel model, the coefficients determining the dependence of the flow stress on the thermomechanical parameters were calculated. The resulting model ensures high convergence of the calculated and experimental data.*

Keywords: *deformable aluminum alloys, computer modeling, rheological properties, flow stresses, Hensel-Spittel rheological model*

For citation: Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglochkova Yu.S. Construction of a rheological model of deformable aluminum alloy 1163 for computer simulation of metal pressure processes. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-24-33.

Введение

В настоящее время компьютерное моделирование широко используется при разработке различных технологических процессов обработки металлов давлением. Оно позволяет в значительной мере упростить задачу технологов по проектированию штамповой оснастки и разработке термомеханических режимов деформации.

Использование компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением обеспечивает:

- повышение точности результатов расчета формообразования. Корреляция экспериментальных и расчетных (полученных методом математического моделирования с учетом реологических свойств) данных обеспечена на уровне 90–95 %;
- снижение материальных затрат на проведение прямых экспериментов по отработке технологии обработки давлением в 2–3 раза;
- сокращение трудоемкости операций доработки штамповой оснастки на 50–60 %;
- уменьшение припусков и напусков на 30–40 %, увеличение коэффициента использования материала на 10–15 % [1–3].

Программные комплексы для проведения компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением включают базы данных реологических свойств различных групп металлов и их сплавов. В базах в основном представлены сплавы, разработанные еще в прошлом столетии, и отсутствуют современные перспективные сплавы, используемые в промышленности. В связи с этим разработчики технологий изготовления деформированных полуфабрикатов нередко пользуются реологическими моделями сплавов-аналогов, что неизбежно приводит к ошибкам моделирования и некорректным расчетным данным энергосиловых параметров [4–7].

Для решения данной проблемы и успешного моделирования необходимо создание реологической модели используемого материала. Последовательность создания такой модели состоит из следующих шагов:

- проведение экспериментальных исследований по определению напряжения течения сплава при различных температурах и скоростях деформации;
- расчет коэффициентов, определяющих зависимость напряжения течения от термомеханических параметров деформации, по выбранной эмпирической модели;
- сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных;
- корректировка реологической модели (при необходимости).

Экспериментальные исследования проводятся методом осадки цилиндрических образцов при различных температурах и скоростях деформации. В отличие от испытаний на растяжение и кручение, метод осадки позволяет получить напряжения течения для более высоких значений деформаций.

Кривые «напряжение течения–степень деформации» можно интегрировать в программные комплексы для моделирования в виде табличных данных. Зачастую для этих целей используют различные эмпирические модели, которые применяются во многих программных комплексах, таких как QForm, Deform, Forge3D. Одной из таких моделей является уравнение Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами, описывающее взаимосвязь между напряжением, температурой, скоростью и степенью деформации материала [8–11].

Для сравнительного анализа проводится моделирование процесса осадки цилиндрических образцов с заданными условиями, максимально приближенными к реальному эксперименту. По результатам оцениваются кривые энергосиловых параметров деформации.

Если при сравнительном анализе выявлены значительные расхождения, то реологическую модель можно скорректировать с помощью поправочного коэффициента.

В данной работе представлена последовательность действий при разработке реологической модели алюминиевого сплава 1163 для дальнейшего моделирования процессов обработки металлов давлением. Сплав 1163 относится к сплавам системы Al–Cu–Mg,

которые нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения, особенно в авиации. Сплавы этой системы положили начало применению алюминиевых сплавов в силовых конструкциях. Они обладают необходимым сочетанием характеристик вязкости разрушения, выносливости и скорости роста усталостной трещины. Из них изготавливают основные силовые элементы планера – панели крыла, лонжероны, балки, стыковые гребенки, обшивку гермокабины, основные шпангоуты, детали оперения [12–14].

Материалы и методы

Для изготовления образцов выплавлены слитки из деформируемого алюминиевого сплава 1163 в электрической печи сопротивления и установке для получения слитков методом полунепрерывного литья. Выплавленные слитки подвергли гомогенизационному отжигу для устранения последствий дендритной ликвации и повышения пластичности слитков перед дальнейшей деформацией [15].

Для проведения исследований по определению напряжения течения при различных температурах и скоростях деформации изготовлены цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм. При осадке соотношение высоты и диаметра цилиндрической заготовки должно составлять $\leq 2,5$. Такое соотношение обеспечивает устойчивость заготовки в процессе деформации.

Образцы, предназначенные для исследований при повышенных температурах, вырезаны непосредственно из слитка, прошедшего гомогенизацию. Для исследования напряжения течения сплавов при низких температурах из слитков изготовлены деформированные заготовки методомковки.

Деформацию исходных слитков для получения заготовок под вырезку образцов проводили на вертикальном гидравлическом прессе с усилием 10 МН. Бойки под деформацию предварительно нагревали до температуры 250–300 °С.

Испытания образцов из сплава 1163 проводили методом осадки на комплексе для физического моделирования. Температуры испытаний 20, 100, 150 и 200 °С выбраны для модели холодной деформации; 250, 320, 400 и 450 °С – для модели горячей деформации.

Температурные интервалы деформации для проведения испытаний выбраны исходя из рекомендаций по термомеханической обработке сплава 1163. Кроме того, проведены испытания на сжатие при температуре 500 °С для учета возможного перегрева заготовки в процессе деформации. Однако образцы во время испытаний при данной температуре частично разрушились, что связано с резким снижением пластичности сплава 1163 при температурах >470 °С. В дальнейших расчетах такие данные не учитывали.

Скорость деформации для проведения испытаний составила от 0,01 до 60 с⁻¹. Выбранный интервал скоростей деформации подходит для большинства методов обработки металлов давлением.

Степень деформации (60 %) для проведения испытаний выбрана исходя из значений технологической пластичности сплава 1163.

Деформация проведена по схеме одноосного сжатия между двумя плоскими бойками. Образцы нагрели до температуры деформации прямым пропусканием тока, выдержали при этой температуре ≤ 2 мин и деформировали при различных скоростях. Для каждого значения температуры и скорости испытано по три образца. Графики зависимости напряжения течения от температуры, скорости и степени деформации построены по усредненным значениям.

Данные по напряжениям течения сплава интегрированы в программу QForm в виде отдельных моделей для горячей и холодной деформации. Программный комплекс QForm позволяет моделировать большинство процессов обработки металлов давлением. Значения напряжения течения сплава 1163 интегрированы в программу с помощью эмпирической модели Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163 при различной температуре, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены на рис. 1.

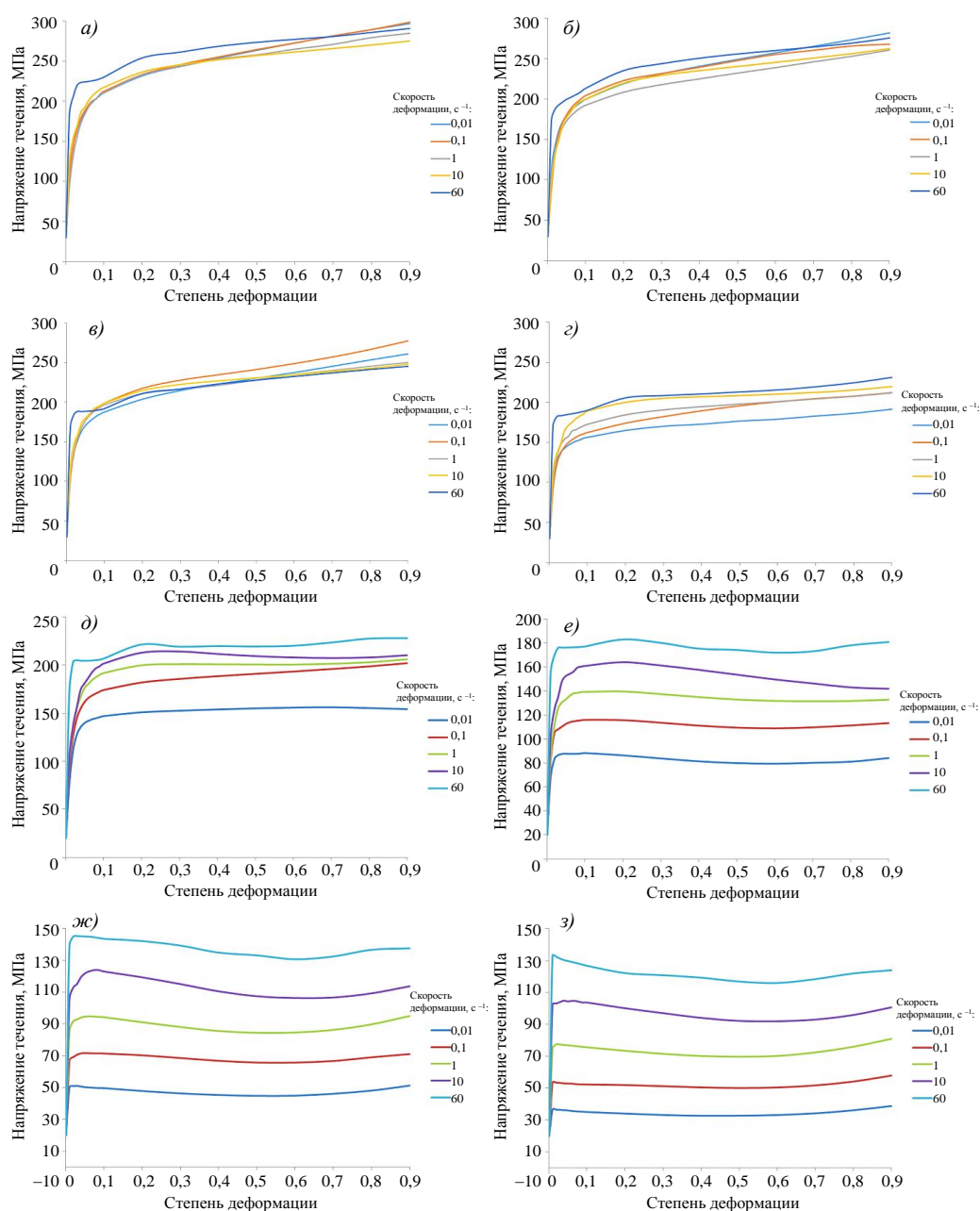


Рис. 1. Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные в результате экспериментальных исследований, при температурах 20 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 250 (д), 320 (е), 400 (ж) и 450 °С (з)

Характер полученных кривых типичен для деформируемых алюминиевых сплавов. С повышением температуры деформации уровень напряжения в заготовках снижается, что связано с интенсивными процессами разупрочнения вследствие протекания процессов динамического возврата, рекристаллизации, старения и растворения выделений упрочняющих фаз. Увеличение скорости деформации, напротив, вызывает повышение уровня напряжения из-за высокой скорости деформационного упрочнения.

Для интеграции полученных данных в программы компьютерного моделирования оптимально использовать математические модели, которые описывают зависимость напряжения течения металлов от температуры, скорости и степени деформации с помощью эмпирических коэффициентов. На практике наиболее часто используется эмпирическая модель Хензеля–Шпиттеля с девятью неизвестными коэффициентами:

$$\sigma = A e^{m_1 T} T^{m_2} \varepsilon^{m_3} e^{m_4/\varepsilon} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_3} \varepsilon^{m_8 T}, \quad (1)$$

где σ – напряжение течения; T – температура, °C; ε – степень деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, s^{-1} ; A , m_1 – m_5 и m_7 – m_9 – эмпирические коэффициенты.

Помимо модели Хензеля–Шпиттеля с девятью коэффициентами, существует эмпирическая модель Хензеля–Шпиттеля с пятью коэффициентами, также описывающая зависимость напряжения течения от температуры, скорости и степени деформации. Однако ее точность недостаточна для построения реологических моделей для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением при высоких температурах, поэтому в данной работе ее не применяли.

Уравнения решали в программе для выполнения технических вычислений с использованием функции, реализующей метод Левенберга–Марквардта для нахождения неизвестных эмпирических коэффициентов. Полученные значения эмпирических коэффициентов представлены в таблице.

Значения эмпирических коэффициентов для сплава 1163

Эмпирические коэффициенты	Значения эмпирических коэффициентов при температуре, °C	
	20–200	250–500
A	242	3530
m_1	–0,00187	–0,0028
m_2	0,13284	0,07048
m_3	0,002507	–0,08589
m_4	–0,00141	–0,00178
m_5	–0,00119	–0,00317
m_7	0,02953	0,46263
m_8	$5,57 \cdot 10^{-5}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$
m_9	0,0749	–0,374

Адекватность полученной модели оценивали путем анализа кривых упрочнения, полученных в результате эксперимента и моделирования процесса осадки, а также по двум критериям, величинам средней ошибки и коэффициента детерминации. Среднюю ошибку рассчитывали по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\sigma_{\text{эксп}} - \sigma_{\text{расч}}}{\sigma_{\text{эксп}}} \right| \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – средняя ошибка; $\sigma_{\text{эксп}}$ и $\sigma_{\text{расч}}$ – значения напряжения течения, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по формуле (1) соответственно; n – количество повторений.

Коэффициент детерминации рассчитывали по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

где $\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ – сумма квадратов остатков регрессии; $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек от среднего значения.

Значение коэффициента детерминации изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение к единице, тем более эффективна полученная модель. Значения средней ошибки составили 5,42 и 7,02 % для моделей холодной и горячей деформации соответственно.

Средняя ошибка <math><10\%</math> считается нормальной для большого объема данных, полученных при решении уравнения нелинейной регрессии. Значения коэффициента детерминации составили 0,95 и 0,97 для моделей холодной и горячей деформации соответственно.

Значения коэффициента детерминации >0,9 свидетельствуют о высокой схожести результатов и возможности применения полученной модели.

На рис. 2 представлены зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем и рассчитанные по формуле (1).

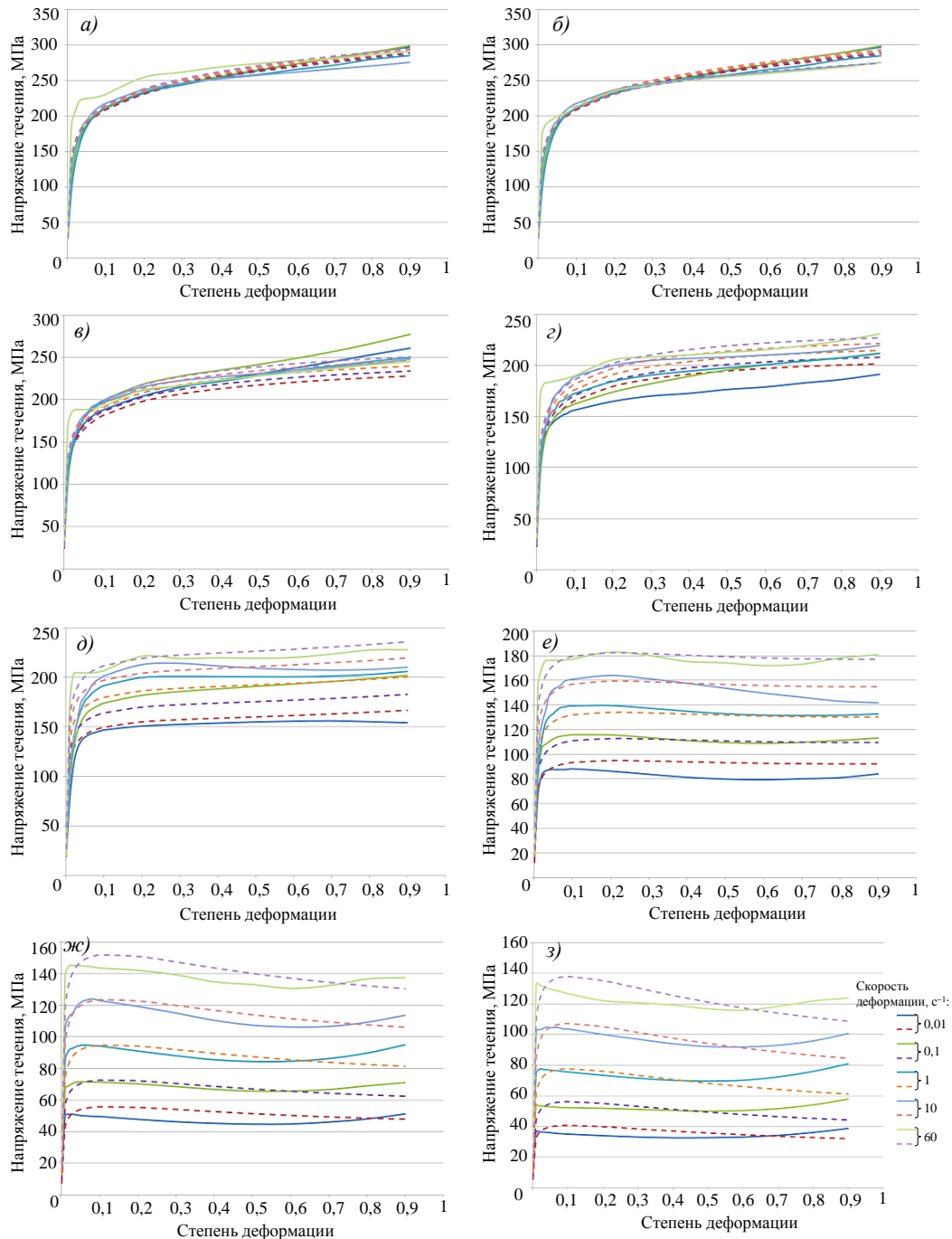


Рис. 2. Зависимости напряжения течения от степени деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем (—) и рассчитанные по формуле (1) (- - -), при температурах 20 (а), 100 (б), 150 (в), 200 (г), 250 (д), 320 (е), 400 (ж) и 450 °С (з)

Характер полученных кривых сопоставим. При скоростях деформации от $0,1$ до 10 с^{-1} расчетные кривые с высокой степенью точности совпадают с экспериментальными. При скоростях деформации $0,01$ и 60 с^{-1} наблюдаются небольшие отклонения от экспериментальных данных.

Для анализа полученной модели проведено компьютерное моделирование процесса осадки цилиндрических образцов в условиях, максимально приближенных к экспериментальным. Помимо получения зависимостей «напряжение течения–степень деформации», для построения реологической модели сплава необходимо внести в программу значения физических свойств материала, а именно: теплоемкости, теплопроводности, температурного коэффициента линейного расширения, модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности. Значения перечисленных свойств указаны в паспорте на сплав.

Значения напряжения течения сплава 1163 внесены в программу QForm в виде формулы Хензеля–Шпиттеля с девятью коэффициентами для моделей холодной и горячей деформации. Результаты эксперимента и моделирования сравнивали по кривым «усилие–продолжительность деформации». На рис. 3 представлены кривые «усилие–продолжительность деформации», полученные экспериментальным путем и в результате компьютерного моделирования, при температурах 150 и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и скоростях деформации 1 и $0,1 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

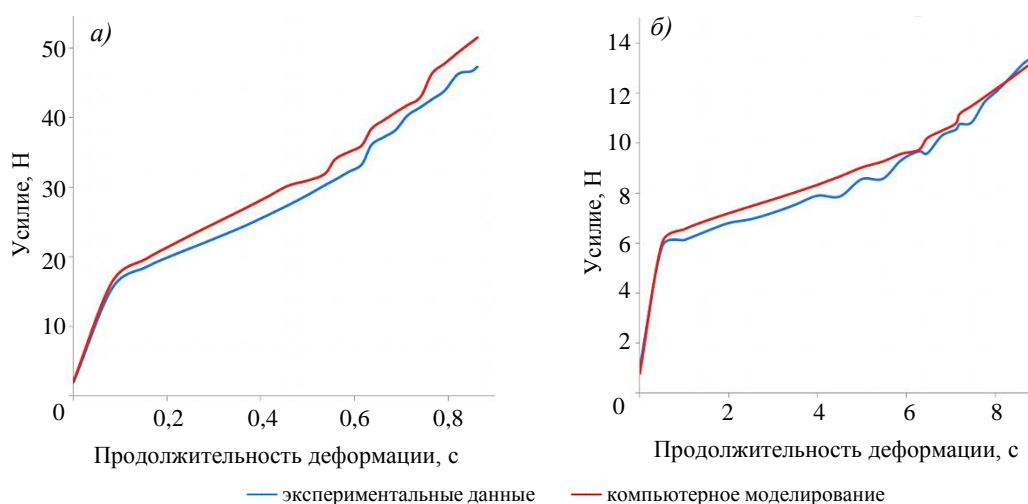


Рис. 3. Зависимости усилия от продолжительности деформации сплава 1163, полученные экспериментальным путем и в результате компьютерного моделирования, при температурах 150 (а) и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (б), скоростях деформации 1 (а) и $0,1 \text{ с}^{-1}$ (б)

Кривые «усилие–продолжительность деформации», полученные экспериментальным путем и в ходе компьютерного моделирования, совпадают. Анализ данных показал, что средняя ошибка составляет 8 и 5% для температур 150 и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно, что доказывает возможность применения разработанной реологической модели сплава 1163 для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Заключения

Определены напряжения течения деформируемого алюминиевого сплава 1163 при различных температурах, скоростях и степенях деформации методом осадки цилиндрических образцов.

Интеграцию полученных данных в программы для моделирования процессов обработки металлов давлением проводили с помощью эмпирической модели Хензеля–Шпиттлера с девятью неизвестными коэффициентами. Коэффициенты найдены с помощью метода Левенберга–Марквардта в программном комплексе для выполнения технических вычислений. Помимо значений напряжения течения, в реологическую модель внесены показатели физических свойств сплава 1163, указанные в паспорте на материал.

Адекватность полученной модели проверили с помощью сравнительного анализа кривых «напряжение течения–степень деформации», а также расчета средней ошибки и коэффициента детерминации. Установлено, что характер кривых совпадает, величина средней ошибки регрессии не превышает 10 %, а коэффициент детерминации составляет 0,95 и 0,97 для моделей холодной и горячей деформации соответственно. Это свидетельствует о высокой степени достоверности полученных данных и возможности использования реологической модели для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Проведенное моделирование процесса осадки цилиндрического образца показало, что размеры осажённых образцов практически совпадают с размерами компьютерной модели. Анализ зависимостей «усилие–продолжительность деформации» также подтвердил высокую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Установлено, что разработанная реологическая модель алюминиевого сплава 1163 может применяться для моделирования различных процессов обработки металлов давлением.

Список источников

1. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 141–147.
2. Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Селиванов А.А. Применение методов математического моделирования при разработке режимов деформации алюминий-литиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-20-34.
3. Капитаненко Д.В., Моисеев Н.В., Баженов А.Р., Гладков Ю.А. Разработка с применением компьютерного моделирования технологии изотермической штамповки на воздухе заготовок дисков турбокомпрессоров // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.
4. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
5. Некрасов Б.Р., Бубнов М.В., Скляренко В.Г. и др. Разработка и оптимизация технологии изготовления штамповки диска из сплава ЭП975-ИД с применением компьютерного моделирования // *Тез. докл. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь в авиационном материаловедении»*. М.: ВИАМ, 2008. С. 25.
6. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисунец Н.Л. и др. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // *Цветные металлы*. 2007. № 5. С. 98–101.
7. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2004. № 9. С. 38–43.
8. Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А. и др. Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 3. С. 78–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88.

9. Потапенко К.Е., Воронков В.И., Петров П.А. Определение модели сопротивления деформации по изотермическим кривым текучести // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 8. С. 32.
10. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1983. 351 с.
11. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: пер. с нем. М.: Metallurgy, 1982. 360 с.
12. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
13. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб., 2012. Ст. 08.
14. Каблов Е.Н., Дынин Н.В., Бенариев И., Щетинина Н.Д., Самохвалов С.В., Неруш С.В. Перспективные алюминиевые сплавы для паяных конструкций авиационной техники // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. № 4. С. 179–192.
15. Асташкин А.И., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и технологическую пластичность слитков из алюминиевого сплава 1163 // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

References

1. Ospennikova O.G., Bubnov M.V., Kapitanenko D.V. Computer modeling of metal working processes by pressure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 141–147.
2. Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Selivanov A.A. The approaches that are used for developed of optimal strain modes of aluminum-lithium alloys (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-20-34.
3. Kapitanenko D.V., Moiseev N.V., Bazhenov A.R., Gladkov Yu.A. Development of the isothermal deformation on air technology of production turbocharger disks using computer modeling. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-13-21.
4. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer simulation of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
5. Nekrasov B.R., Bubnov M.V., Sklyarenko V.G. et al. Development and optimization of the technology for manufacturing a stamped disk from EP975-ID alloy using computer modeling. *Reports of the youth scientific and technical conf. «Youth in aviation materials science»*. Moscow: VIAM, 2008, p. 25.
6. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L. et al. Use of specialized programs in the development of technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
7. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 38–43.
8. Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A. et al. Obtaining rheological models of aluminum alloy RS-356 under various deformation modes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 78–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88.
9. Potapenko K.E., Voronkov V.I., Petrov P.A. Determination of the deformation resistance model based on isothermal yield curves. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2013, no. 8, p. 32.
10. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Resistance of plastic deformation of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 351 p.

11. Hensel A., Shpittel T. *Calculation of energy-power parameters in metal forming processes*: trans. from Germ. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p.
12. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
13. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Promising aluminum alloys and their joining technologies for aerospace products. *Reports of the 2nd Int. Conf. «Aluminum-21. Welding and Soldering»*. St. Petersburg, 2012, art. 8.
14. Kablov E.N., Dynin N.V., Benarieb I., Shchetinina N.D., Samokhvalov S.V., Nerush S.V. Promising aluminum alloys for brazed structures of aircraft equipment. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 179–192.
15. Astashkin A.I., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. The influence of homogenization annealing on the structural phase evolution and technological plasticity of aluminum alloy 1163 ingots. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

Информация об авторах

Шпагин Александр Сергеевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баженов Александр Романович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Антипов Константин Валерьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Оглодкова Юлия Сергеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander S. Shpagin, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander R. Bazhenov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Antipov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yuliya S. Oglochkova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.09.2024.

The article was submitted 17.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.09.2024.