

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.186

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88



## ПОЛУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА RS-356 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДЕФОРМАЦИИ

Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А.,  
Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье приведены результаты сравнительного анализа применения реологических моделей с 5-ю и 9-ю коэффициентами, основанных на эмпирической формуле Хензеля-Шпилтеля. Исследуемый материал – новый алюминиевый сплав RS-356 (Al – 92,58; Si – 6,83; Mg – 0,29; Mn – 0,002; Fe – 0,14; Ti – 0,15; Cu – 0,002; Zn – 0,003), заготовки из которого формируются методом селективного лазерного сплавления. Значения неизвестных коэффициентов определены за счет проведения натурного и вычислительного экспериментов – реализован метод решения обратной задачи, а также применения оригинальной методики обработки результатов натурного эксперимента. Натурный эксперимент проведен методом испытания цилиндрических образцов исследуемого сплава RS-356 на сжатие в диапазоне температур от 20 до 450°C при постоянных скоростях деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup>. Образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм получены методом электроэррозии из заготовок сплава RS-356. Вычислительный эксперимент выполнен с применением программного комплекса QFORM, значения неизвестных коэффициентов в реологических моделях – программы Matlab. Точность определения значений коэффициентов в каждой из полученных моделей оценивается по коэффициенту детерминации  $R^2$ . Так, для модели с 9-ю коэффициентами  $R^2 = (0,95-0,97)$  в зависимости от температурного интервала. Установленные зависимости с 9-ю коэффициентами для описания реологических свойств сплава RS-356 обеспечивает точность прогнозирования силовых параметров при моделировании процесса пластической деформации в пределах 5% и могут быть применены при компьютерном моделировании операций обработки давлением для температурного интервала 20-450°C и скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup>.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав RS-356, испытание на сжатие, реологическая модель Хензеля-Шпилтеля, кривая текучести, модель сопротивления деформации

© Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А., 2023

### Для цитирования

Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации / Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 78-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# OBTAINING RHEOLOGICAL MODELS OF ALUMINUM ALLOY RS-356 UNDER VARIOUS DEFORMATION MODES

Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A.,  
Pham Van Ngoc, Nguyen Khanh Toan, Gnevashev A.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

**Abstract.** The paper presents a comparative analysis of the use of rheological models with 5 and 9 coefficients based on the Hensel-Spittel empirical formula. The material under study is a new aluminum alloy, RS-356 (Al – 92.58; Si – 6.83; Mg – 0.29; Mn – 0.002; Fe – 0.14; Ti – 0.15; Cu – 0.002; Zn – 0.003), workpieces from which are formed by selective laser melting. The values of the unknown coefficients were determined by carrying out full-scale and computational experiments, namely a method for solving the inverse problem, as well as using an original method for processing the results of the full-scale experiment. The full-scale experiment was carried out by testing cylindrical specimens of alloy RS-356 under study for compression in the temperature range from 20 to 450 °C at constant strain rates of 0.001, 0.01 and 0.4 s<sup>-1</sup>. The specimens with a diameter of 10 mm and a height of 10 mm were produced by electroerosion from workpieces of the RS-356 alloy. The computational experiment was carried out using the QFORM software package; values of unknown coefficients in rheological models – applying Matlab software. Accuracy of the values of the coefficients in each of the obtained models is estimated by coefficient of determination  $R^2$ . So, regarding a model with 9 coefficients,  $R^2 = (0.95-0.97)$  depending on the temperature interval. The established dependencies with 9 coefficients for describing the rheological properties of RS-356 provide accuracy of predicting force parameters, when modeling the plastic deformation process within 5% and can be used in computer modeling of metal forming operations for a temperature range of 20-450 °C and strain rates of 0.001, 0.01 and 0.4 s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** RS-356 aluminum alloy, compression test, Hensel-Spittel rheological model, yield curve, deformation stress model

## For citation

Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A., Pham Van Ngoc, Nguyen Khanh Toan, Gnevashev A.A. Obtaining Rheological Models of Aluminum Alloy RS-356 under Various Deformation Modes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 78-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88>

## Введение

Обработка алюминиевых сплавов под давлением может быть сложной операцией из-за ряда факторов. Высоколегированные алюминиевые сплавы склонны при деформации к трещинообразованию вследствие низкой пластичности. Образованию дефектов в виде трещин способствует наличие таких примесей, как кислород, водород, железо, кремний [1]. Кроме того, температурные условия и давление, используемые при обработке алюминиевых сплавов, должны быть тщательно контролируемые, чтобы обеспечить желаемую микроструктуру и механические свойства. С целью преодоления этих проблем используются различные технические приемы, такие как использование добавок, предварительные подготовительные процессы и точный контроль параметров обработки [2]. Также может использоваться охлаждение во время обработки для уменьшения температуры металла и замедления реакций, которые могут вызывать повреждения. В зависимости от применяемых технологий и условий ре-

зультаты обработки могут значительно различаться. Поэтому важно выбирать технологические параметры, обеспечивающие получение желаемых свойств и качества продукта. Обеспечение таких параметров возможно только при наличии реологических зависимостей материалов, позволяющих максимально точно моделировать процесс формообразования заготовок [3-5].

Целью настоящей статьи является получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 (AlSi7Mg) с 5-ю и 9-ю неизвестными коэффициентами и определение рациональной области их использования.

## Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала рассматривается порошковый алюминиевый сплав RS-356. (химический состав, % (вес): Al – 92,58; Si – 6,83; Mg – 0,29; Mn – 0,002; Fe – 0,14; Ti – 0,15; Cu – 0,002; Zn – 0,003 [6]), обладающий хорошими литейными свойствами и высокой производительностью при селективном лазерном сплавлении; является аналогом литейных алю-

миниевых сплавов системы Al-Si.

Сплав RS-356, разработанный компанией ОК «РУСАЛ», производится в соответствии с ТУ 24.42.00-002-44669951-2019; исходное состояние поставки – порошок, предназначенный для аддитивного производства по технологии аддитивного лазерного сплавления (SLM).

Для получения реологической модели были применены цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм, изготовленные методом электроэрозии из заготовок сплава RS-356, полученных по технологии SLM.

Испытания на сжатие провели с помощью универсальных испытательных машин моделей LFM250 (при температуре 20°C) и LFM50 (при температурах 300, 400 и 450°C). При проведении испытаний технологическая смазка не используется; фактор трения, в случае применения при компьютерном моделировании модели трения А.Н. Леванова, принимается равным 0,8-1,0. Допущение о максимальном трении на контактной поверхности принимается для сохранения граничных температурных условий в каждом испытании; давление при температуре выше 20°C на контактную поверхность смазки приводит к нарушению граничных температурных условий. На этапе обработки результатов испытаний учитывается влияние контактного трения на сопротивление деформации в соответствии с рекомендациями, представленными в работах [7, 8]. Деформация осуществлялась со скоростями 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup>. Постоянство скорости деформации обеспечивалось путем управления скоростью перемещения траверсы испытательной машины в соответствии с формулой [9]:

$$S_i = h_o - \exp(-\dot{\varepsilon}_i \cdot t) \cdot h_o, \quad (1)$$

где  $S_i$  – перемещение траверсы испытательной машины, мм;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с;  $h_o$  – исходная высота образца исследуемого материала, мм.

Более подробные сведения о методике обработки экспериментальных данных об испытаниях на сжатие представлены в работе [9].

### Полученные результаты и их обсуждение

Полученные испытанием на сжатие зависимости напряжения текучести от величины и скорости деформации при различных температурах показаны на **рис. 1** [9].

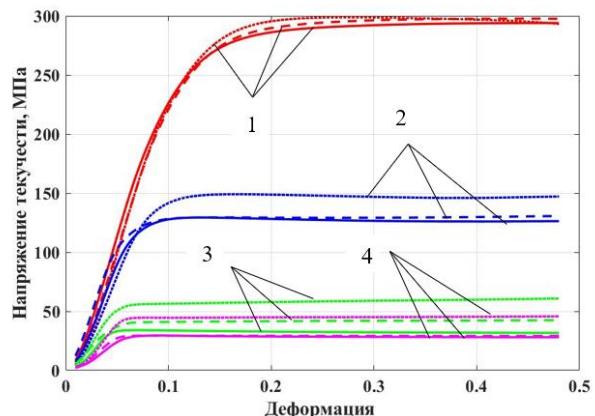


Рис. 1. Экспериментальные зависимости напряжения текучести сплава RS-356 от деформации при различных температурно-скоростных режимах деформации: 1 – 20°C; 2 – 300°C; 3 – 400°C; 4 – 450°C

Fig. 1. Experimental dependences between yield stress of RS-356 and deformation at various temperatures and rates of strain: 1 is 20°C; 2 is 300°C; 3 is 400°C; 4 is 450°C

— 0,001 с<sup>-1</sup>; — 0,01 с<sup>-1</sup>; ····· 0,4 с<sup>-1</sup>

При температуре испытания 20°C наблюдалось образование трещин на поверхности сжимаемых образцов при достижении накопленной (логарифмической) деформации  $\varepsilon = 0,45 - 0,48$  (табл. 1). В диапазоне температур от 300 до 450°C деформация  $\varepsilon$  образцов сжатием на величину 0,31-0,62 не приводит к появлению трещин. Учитывая особенности пластического деформирования сплава RS-356, необходимость создания реологической модели материала в широком диапазоне значений температуры, а также ярко выраженный горизонтальный участок на кривых текучести (см. **рис. 1**), кривые текучести строили до  $\varepsilon = 0,48$ . Для некоторых образцов (см. **табл. 1**) применяли экстраполяцию до большего значения деформации.

В **табл. 1** показан внешний вид (форма боковой поверхности) образцов порошкового алюминиевого сплава RS-356 после сжатия в различных температурно-скоростных режимах.

В практике построения математической модели сопротивления деформации для аппроксимации экспериментальных кривых «напряжение текучести – деформация», отражающих зависимость напряжения текучести от термомеханических параметров – температуры, деформации и скорости деформации, применяют одну из математических зависимостей, например, в виде степенной или экспоненциальной функции либо в виде зависимости, основанной на методе термомеханических коэффициентов [10].

Таблица 1. Внешний вид образцов порошкового алюминиевого сплава RS-356 после сжатия  
Table 1. Appearance of RS-356 powder aluminum alloy specimens after compression

Номер образца	Фото образца после испытания на сжатие	Температура образца, °C	Величина деформации $\varepsilon$	Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ , $\text{с}^{-1}$
1		20	0,48	0,001
2		20	0,45	0,01
3		20	0,48	0,4
4		300	0,56	0,001
5		300	0,46	0,01
6		300	0,31	0,4
7		400	0,46	0,001
8		400	0,34	0,01
9		400	0,48	0,4
10		450	0,63	0,001
11		450	0,62	0,01
12		450	0,54	0,4

В первую очередь рассмотрена эмпирическая модель Хензеля-Шпиттеля с 9-ю неизвестными коэффициентами, определяющая зависимость напряжения текучести от термомеханических параметров. Математическое представление данной модели может быть выражено формулой (2) [11]. Неизвестные коэффициенты определяются из решения задачи регрессии с применением результатов проведенных экспериментальных испытаний (см. рис. 1 и табл. 1):

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \times \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \dot{\dot{\varepsilon}}_i^{m_8 T}, \quad (2)$$

где  $A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$  – неизвестные коэффициенты.

Для решения задачи регрессии составлена программа в среде Matlab, в которой использована функция «lsqcurvefit» из библиотеки Matlab, реализующая метод Левенберга-Маркардта [12]. Данный метод обеспечивает поиск значений коэффициентов, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов в формуле (2) для алюминиевого сплава RS-356 [12]  
Table 2. Coefficients in formula (2) for aluminum alloy RS-356 [12]

Тип деформации	$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_7$	$m_8$	$m_9$
20-300°C	214,042	-0,0021	-0,3945	0,003	-0,0994	-0,0028	0,3474	$6,77 \cdot 10^{-5}$	0,0501
400-450°C	10,597	-0,0086	-0,082	0,3438	-0,0204	-0,0026	0,8587	-0,0006	0,8813

Сравнение результатов расчета напряжений текучести по формуле (2) с экспериментальными данными показано на **рис. 2**. В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина:

- средней абсолютной ошибки  $S$ :

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}_i|}{|\sigma_i|} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- коэффициента детерминации  $R^2$ :

$$SE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_i)^2;$$

$$SE_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{сред}})^2; \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SE}{SE_{\text{сред}}},$$

где  $n$  – объем выборки;  $\sigma_i$  –  $k$ -е экспериментальное значение напряжения текучести, полученное в эксперименте при деформации  $\varepsilon_{ik}$  и фиксированном значении скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_i$  и температуры  $T_i$ ;  $\bar{\sigma}_i$  –  $k$ -е расчетное значение напряжения текучести, полученное по формуле (2) с учетом значений коэффициентов (см. **табл. 2**);  $\sigma_{\text{сред}}$  – среднее арифметическое значение напряжения текучести по полученным в эксперименте данным.

Второй показатель для оценки качества математической модели представлен формулой (4) и позволяет оценить, какая доля дисперсии может быть предсказана моделью в известных экспериментальных данных. Считается, что при  $R^2$ , принимающем значение от 0,8 до 1,0, математическая модель хорошего качества.

Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента позволил оценить значения ошибки  $S$  для моделей с 9-ю неизвестными коэффициентами (см. **рис. 2**). В среднем ошибка  $S$  в

диапазоне температур 20-300°C не превышает 6,9%, в диапазоне температур 400-450°C – 9,7%. Значения коэффициента детерминации  $R^2$  в диапазоне температур 20-300°C – 0,97, в диапазоне температур 400-450°C – 0,95. Полученная модель позволяет достаточно точно прогнозировать возникающие напряжения в зависимости от скорости и величины деформации (см. **рис. 2**).

В качестве второй математической модели была выбрана модель Хензеля-Шпиттеля с 5-ю неизвестными коэффициентами, которая может быть выражена формулой [11]

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^{m_2} \exp(-m_4 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \exp(-m_1 T), \quad (5)$$

где  $A, m_1, m_2, m_3, m_4$  – неизвестные коэффициенты.

Формула (5) решается аналогично формуле (2). Найденные коэффициенты приведены в **табл. 3**.

Результаты эксперимента и расчета моделей с 5-ю неизвестными коэффициентами показаны на **рис. 3**. В среднем ошибка  $S$  в диапазоне температур 20-300°C не превышает 14,2%, в диапазоне температур 400-450°C – 11,7%. Значения коэффициента детерминации  $R^2$  в диапазоне температур 20-300°C – 0,96, в диапазоне температур 400-450°C – 0,92. Эти результаты показывают, что полученная модель обеспечивает достаточно хорошую точность прогнозирования силовых параметров.

Сравнение кривых текучести, построенных по результатам расчетов напряжения текучести по формулам (2) и (5), с учетом значений коэффициентов (см. **табл. 2 и 3**), представлено на **рис. 4**.

В диапазоне температур 20-450°C формулы (2) и (5) позволяют получать достаточно точные значения коэффициента детерминации  $R^2$  расчетных напряжений текучести, который достигает 0,92-0,97. Однако результаты моделирования с использованием формулы (5) имеют более высокие значения средней абсолютной ошибки  $S$  (11,7-14,2%).

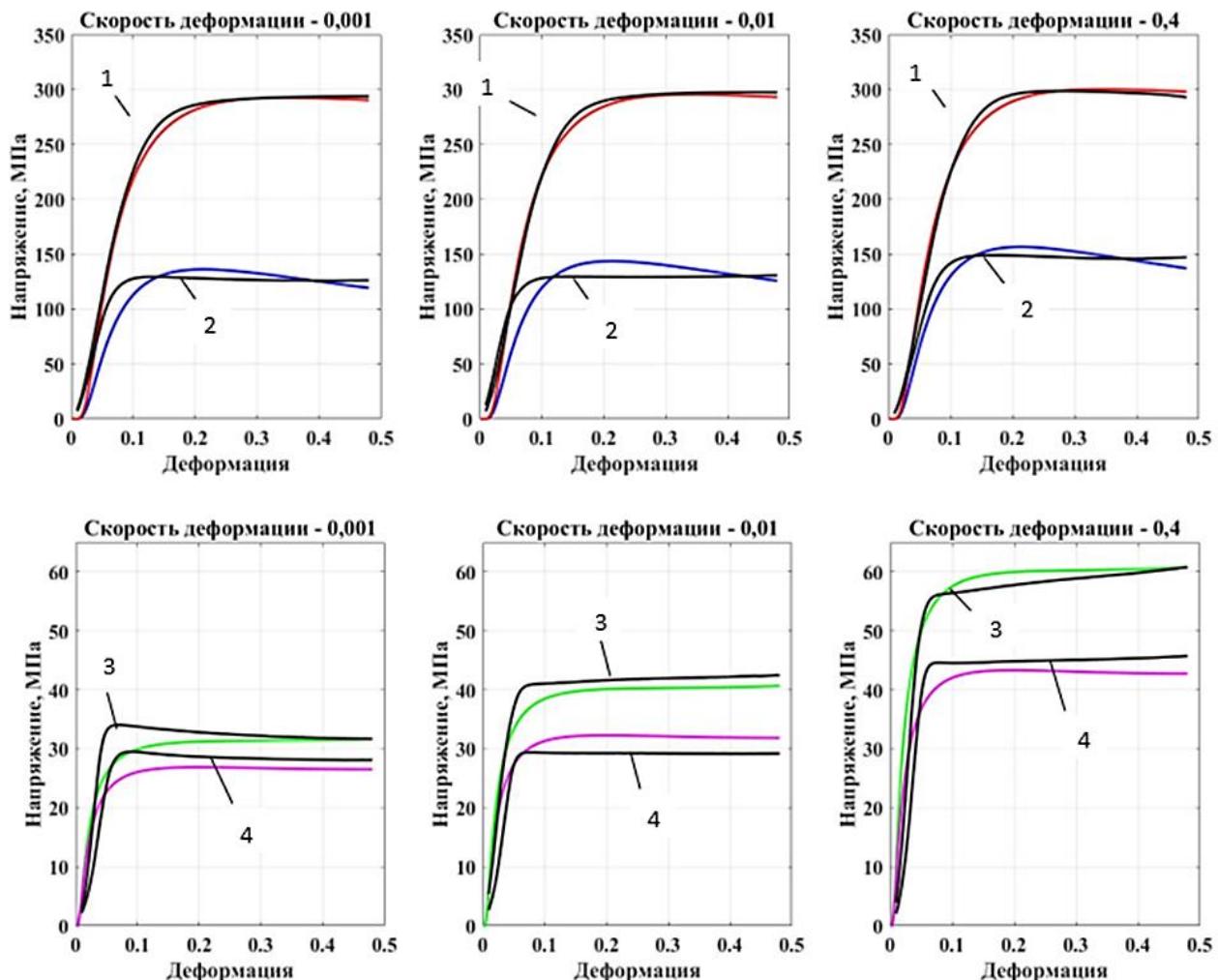


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

- данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C)
- результаты расчета по формуле (2) при 20°C
- результаты расчета по формуле (2) при 300°C
- результаты расчета по формуле (2) при 400°C
- результаты расчета по формуле (2) при 450°C

Fig. 2. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

- experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C)
- calculation results according to formula (2) at 20°C
- calculation results according to formula (2) at 300°C
- calculation results according to formula (2) at 400°C
- calculation results according to formula (2) at 450°C

Таблица 3. Значения коэффициентов в формуле (5) для алюминиевого сплава RS-356  
Table 3. Coefficients in formula (5) for aluminum alloy RS-356

Тип деформации	$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
20-300°C	3021,0675	0,0025	0,9756	0,0086	3,3721
400-450°C	1832,3114	0,0056	0,4317	0,0966	1,7197

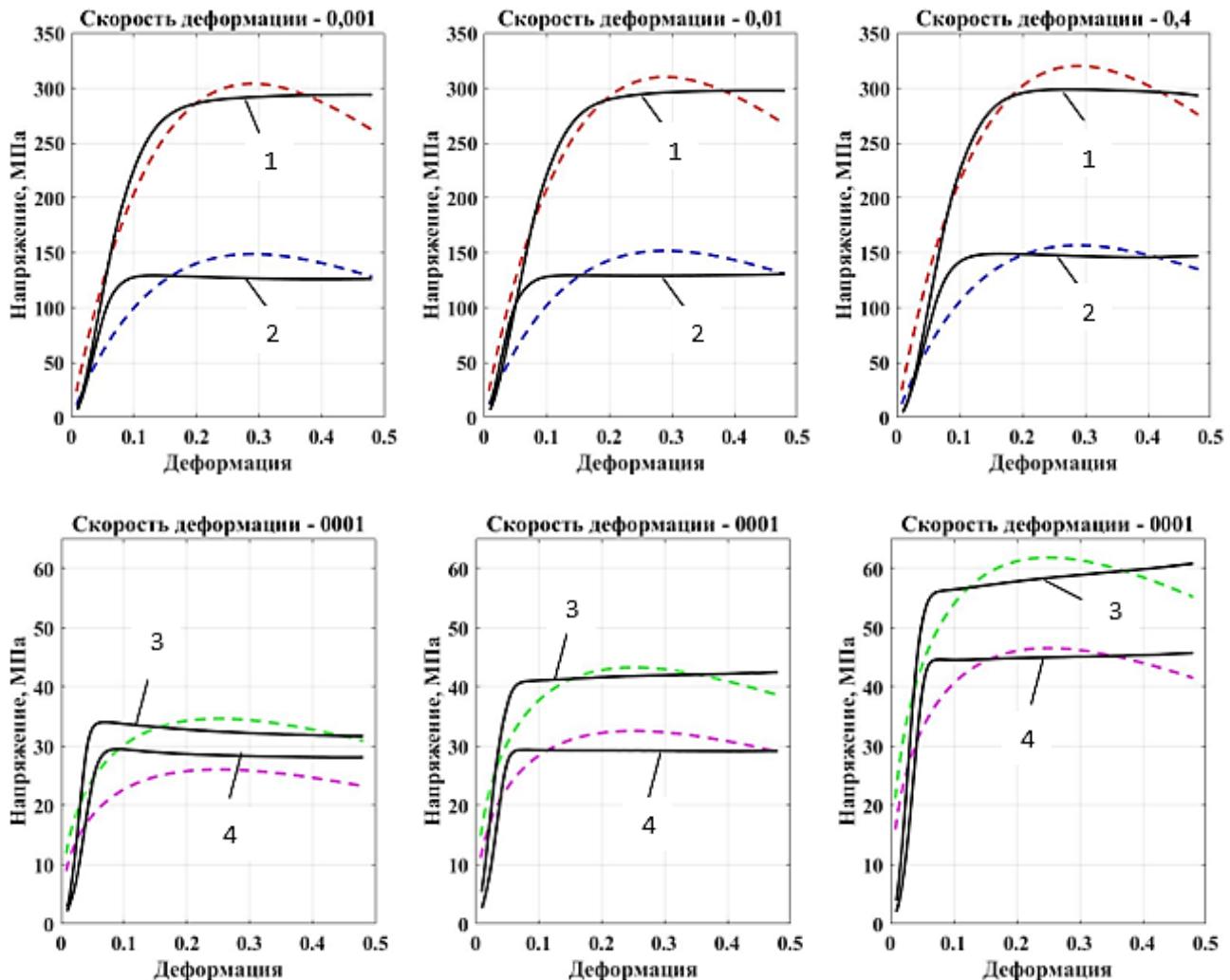


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

- данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C)
- результаты расчета по формуле (2) при 20°C
- результаты расчета по формуле (2) при 300°C
- результаты расчета по формуле (2) при 400°C
- результаты расчета по формуле (2) при 450°C

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

- experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C)
- calculation results according to formula (2) at 20°C
- calculation results according to formula (2) at 300°C
- calculation results according to formula (2) at 400°C
- calculation results according to formula (2) at 450°C

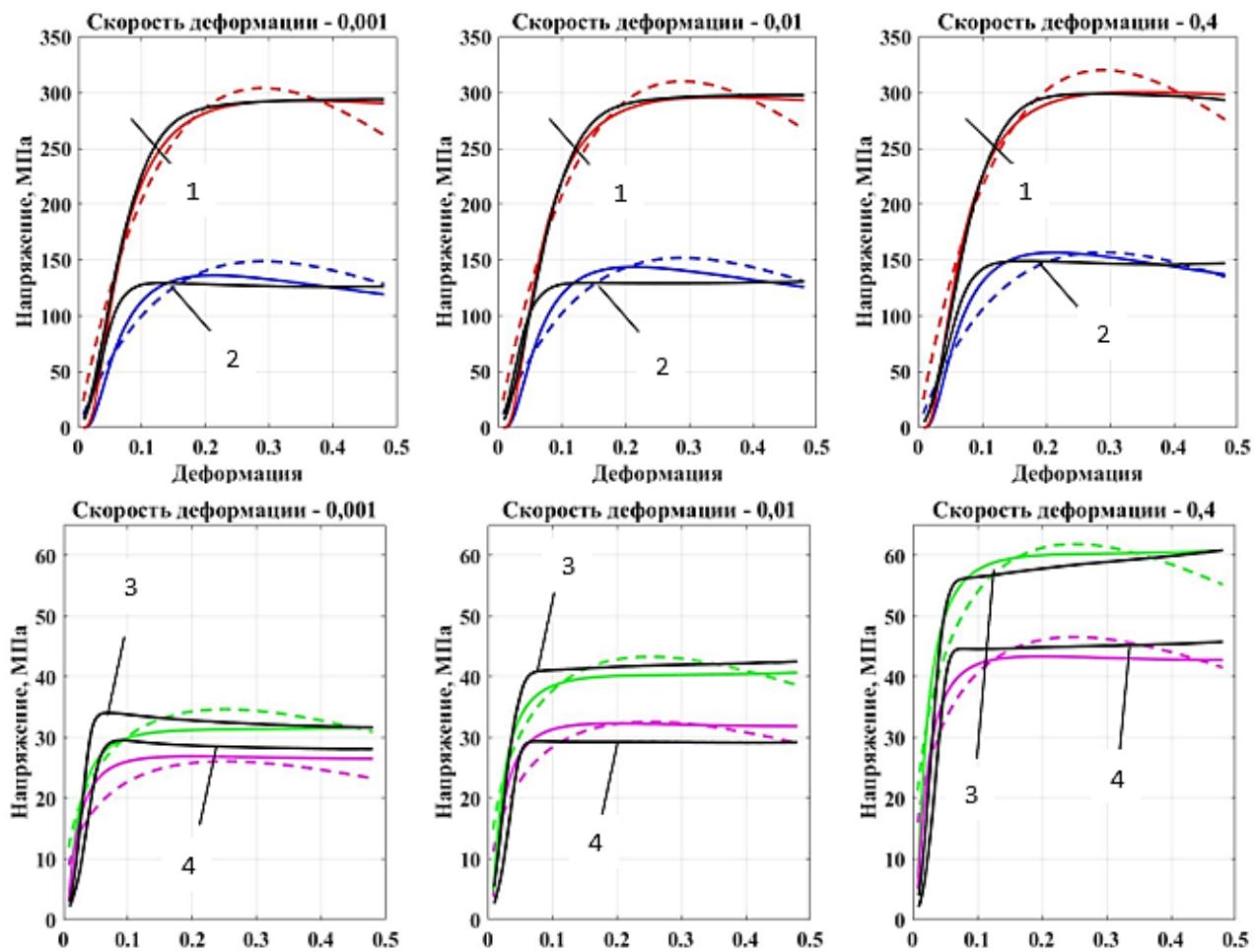


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

— данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C);  
 —— расчетная кривая по формуле (2);  
 --- расчетная кривая по формуле (5) (— при 20°C; — при 300°C; — при 400°C; — при 450°C)

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

— experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C);  
 —— calculated curve according to formula (2);  
 --- calculated curve according to formula (5) (— at 20°C; — at 300°C; — at 400°C; — at 450°C)

Таким образом, при моделировании процессов формообразования заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 в равной степени возможно применение математической модели напряжения текучести с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами (формулы (2) и (5)). Применение модели с 9-ю неизвестными коэффициентами позволяет повысить точность аппроксимации экспериментальных данных – ошибка не превышает 9,7%.

Подробнее методика постановки виртуального эксперимента, направленного на верификацию математической модели деформируемого материала, представлена в работе [9]. В качестве крите-

рия точности определения математической модели материала выбрана формула оценки средней абсолютной ошибки, записанная в виде [12]

$$\delta = \left| \frac{P_{FEM} - P_{\text{эксп}}}{P_{\text{эксп}}} \cdot 100\% \right| \leq 5,0\%, \quad (6)$$

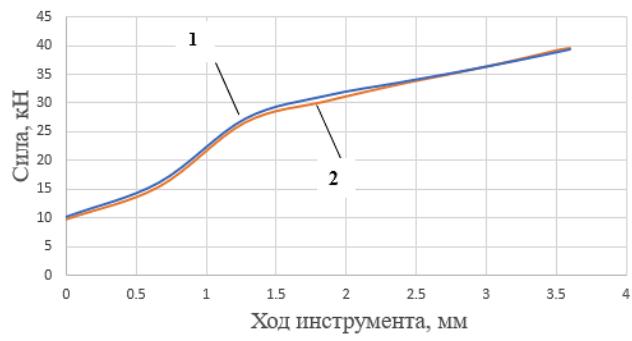
где  $\delta$  – средняя абсолютная ошибка;  $P_{FEM}$  – сила деформирования по результатам расчета в программе QForm;  $P_{\text{эксп}}$  – сила деформирования, измеренная в эксперименте.

На рис. 5 представлены результаты виртуального и натурного экспериментов при температуре 20 и 450°C. В представленном примере

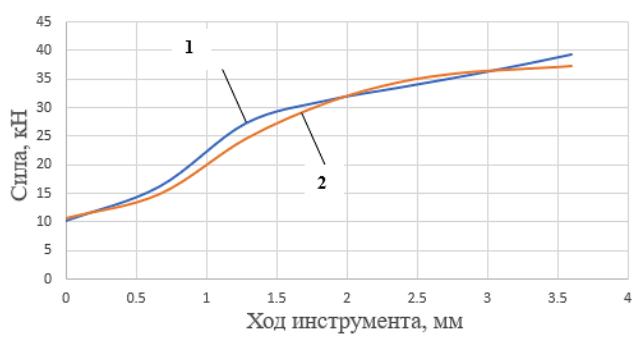
видно, что применение реологической модели с 9-ю коэффициентами обеспечивает более высокую точность расчета сил деформирования.

Анализ значений сил деформирования при сжатии заготовки из сплава RS-356 при температуре 20 и 450°C (рис. 6) показал, что применение

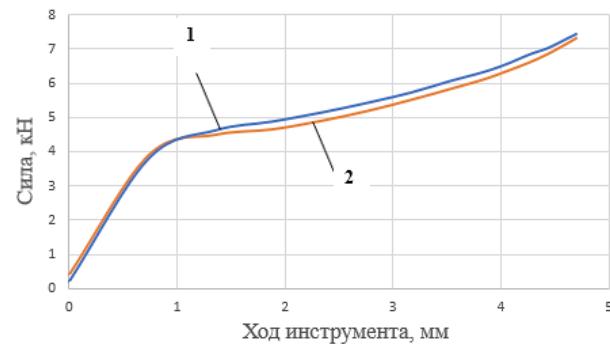
реологической модели материала, основанной на формуле (2), обеспечивает погрешность расчета не более 4,0% (при 20°C) и не более 5,0% (при 450°C), что соответствует условию формулы (7). При использовании модели по формуле (5) погрешность расчета превышает 10%.



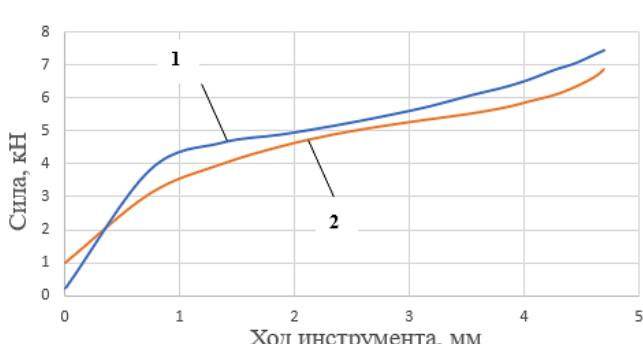
а



б



в

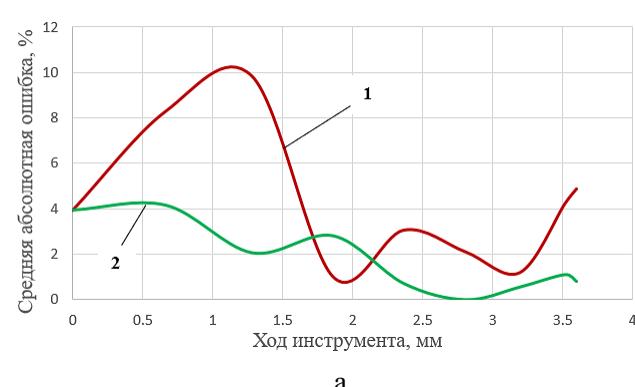


г

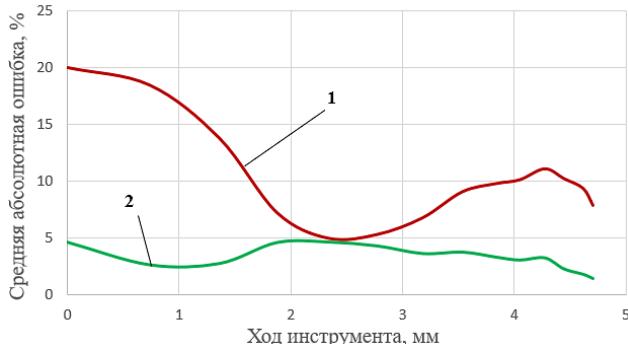
Рис. 5. Сравнение графиков «сила деформирования – ход инструмента» при моделировании сжатия образцов сплава RS-356 при температурах 20°C (а, б) и 450°C (в, г) с применением модели материала:

а, в – формула (2); б, г – формула (5); 1 – данные эксперимента; 2 – расчетные данные

Fig. 5. Comparison of the diagrams of “deformation force – tool stroke”, when modeling compression of the RS356 alloy specimens at temperatures of 20°C (a, б) and 450°C (в, г) using the material model: (a), (в) is formula (2); (б), (г) is formula (5); 1 is experimental data; 2 is calculated data



а



б

Рис. 6. Величины средних абсолютных ошибок (δ) сил сжатия образцов при температурах 20°C (а) и 450°C (б): 1 – модель – формула (5) с 5-ю коэффициентами; 2 – модель – формула (2) с 9-ю коэффициентами

Fig. 6. Mean absolute errors (δ) of compression forces of the specimens at temperatures of 20°C (a) and 450°C (б): 1 is a model – formula (5) with 5 coefficients; 2 is a model – formula (2) with 9 coefficients

## Заключение

1. Найдены реологические модели порошкового алюминиевого сплава RS-356 на основе эмпирической модели, предложенной Хензелем и Шпиллером с 5-ю и 9-ю неизвестными коэффициентами для температурного интервала 20-450°C и скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup>.

2. Установлено, что найденная реологическая модель с 9-ю неизвестными коэффициентами обеспечивает точность прогнозирования силовых параметров при моделировании процесса пластической деформации в пределах 5%, а реологическая модель с 5-ю неизвестными коэффициентами – до 14,2%.

3. Результаты исследования позволяют применить найденные реологические модели для моделирования процессов пластического формообразования порошкового алюминиевого сплава RS-356 в широком диапазоне температурно-скоростных режимов.

## Список источников

1. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. / Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
2. Tusar R.S., Ramanuj K., Isham P., Ashok K.S., Amalna P., Rabin K.D. Machinability behavior of Aluminum Alloys: A Brief Study // Materialstoday: Proceedings. 2019, vol. 18, part 7, pp. 5069-5075.
3. Управление процессами формообразования заготовок из титановых сплавов (на примере сплава OT4-1) с использованием моделирования реологии и режимов деформирования / Петров П.А., Хань Тоан Нгуен, Бурлаков И.А., Сухоруков Р.Ю. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. №6. С. 88-95. DOI: 10.31857/S0235711921060134
4. Szeliga D., Goward E., Pietrzyk M. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2006, vol. 195, pp. 6778-6798.
5. Смирнов А.С. Разработка методики идентификации определяющих соотношений для металлов при больших высокотемпературных пластических деформациях: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04. Екатеринбург, 2008. 243 с.
6. Liye Liang, Xuexin Pan, Guilan Wang, Haiou Zhang, Hao Zhang. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg // Journal of Physics: Conference Series. 1939 012041, 2021, pp. 1-6.
7. Charpentier P.L. Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behavior of Aluminum Alloy 2024 / P.L. Charpentier, B.C. Stone, S.C. Ernst, J.R. Thomas // Met. Trans. A. 1986, vol. 17, pp. 2227.
8. Петров П.А. Методика исследования сопротивления деформации при двухэтапном монотонном нагружении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №5. С. 157-174.
9. Построение кривых текучести алюминиевого сплава RS-356 на основе натурного и вычислительного эксперимента / Петров П.А., Фам Ван Нгок, Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А., Во Фан Тхань Дат // Технология легких сплавов. 2023. №1. С. 63-69.
10. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М.: Металлургия, 1964. 270 с.
11. Хензель А., Шпиллер Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением: справочник. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
12. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963, vol. 11, no. 2, p. 431.

## References

1. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buinov N.N. et al. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov: Sprav. izd.* [Metal science of aluminum and its alloys: Reference book]. Moscow: Metallurgy, 1983, 280 p. (In Russ.)
2. Tusar R.S., Ramanuj K., Isham P., Ashok K.S., Amalna P., Rabin K.D. Machinability behavior of Aluminum Alloys: A Brief Study. Materials of Today: Conference Proceedings. 2019;18:5069-5075.
3. Petrov P.A., Khanh Nguyen Toan, Burlakov I.A., Sukhorukov R.Yu. Control of forming processes of titanium alloy blanks (using OT4-1 alloy as an example) using rheology modeling and deformation modes. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]. 2021;(6):88-95. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0235711921060134
4. Szeliga D., Goward E., Pietrzyk M. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2006;195:6778-6798.
5. Smirnov A.S. *Razrabotka metodiki identifikatsii opredelyayushchikh sootnosheniy dlya metallov pri bolshikh vysokotemperaturnykh plasticheskikh deformatsiyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a technique for identifying constitutive relations for metals at high high-temperature plastic deformations. PhD thesis]. Yekaterinburg, 2008. 243 p.
6. Liye Liang, Xuexin Pan, Guilan Wang, Haiou Zhang, Hao Zhang. Microstructure and mechanical properties of the molten AlSi7Mg selective laser. Journal of Physics: Conference Series. 2021;1939:012041.
7. Charpentier P.L., Stone B.C., Ernst S.C., Thomas J.R. Characterization and modelling of high temperature flow behavior of aluminum alloy 2024. Met. Trans. A. 1986;17:2227.
8. Petrov P.A. A method for evaluation of the flow stress under two-stage monotonic loading. *Izvestiya*

*Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya of Tula State University. Engineering Sciences]. 2019;(5):157-174. (In Russ.)

9. Petrov P.A., Pham Ngoc Van, Burlakov I.A., Matveev A.G., Saprykin B.Yu., Petrov M.A., Vo Phan Thanh Dat. Building yield curves of aluminum alloy RS-356 based on a full-scale and computational experiment. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(1):63-69. (In Russ.)

10. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Melnikov A.F. *Soprotivlenie deformatsii stalei pri goryachey prokatke* [Deformation stress of steels during hot rolling]. Moscow: Metallurgy, 1964, 270 p. (In Russ.)

11. Hensel A., Shpittel T. *Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki davleniem: spravochnik* [Calculation of force parameters in metal forming processes: Handbook]. Moscow: Metallurgy, 1982, 360 p. (In Russ.)

12. Marquardt D.V. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*. 1963;11(2): 431-441.

Поступила 24.05.2023; принята к публикации 03.07.2023; опубликована 25.09.2023  
Submitted 24/05/2023; revised 03/07/2023; published 25/09/2023

**Во Фан Тхань Дат** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: vodat2996@gmail.com.

**Петров Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: petrov\_p@mail.ru.

**Бурлаков Игорь Андреевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: iaburlakov@gmail.com.

**Фам Ван Нгок** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: nguyenngoc15101994@gmail.com.

**Нгуен Хань Тоан** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: tolya.vn229@gmail.com.

**Гневашев Андрей Александрович** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, Email: gneandrey@mail.ru.

**Vo Phan Thanh Dat** – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: vodat2996@gmail.com.

**Pavel A. Petrov** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: petrov\_p@mail.ru.

**Igor A. Burlakov** – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: iaburlakov@gmail.com.

**Pham Van Ngoc** – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: nguyenngoc15101994@gmail.com.

**Nguyen Khanh Toan** – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: tolya.vn229@gmail.com.

**Andrey A. Gnevashev** – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, Email: gneandrey@mail.ru.