Крючков Д.И., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г. Моделирование осевого сжатия АМКМ B95/10% SiC в нестационарных термомеханических условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. С. 68–76. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.07

Kryuchkov D.I., Nesterenko A.V., Zalazinsky A.G. Modeling of Axial Compression of V95/10% SiC Aluminum Matrix Composite under Non-Stationary Thermomechanical Conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 4, pp. 68-76. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.07

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.07
УДК 669.715:539.376

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕВОГО СЖАТИЯ АМКМ B95/10% SIC В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Д.И. Крючков, А.В. Нестеренко, А.Г. Залазинский

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 30 ноября 2022 г.
Одобрена: 13 августа 2023 г.
Принята к публикации:
31 августа 2023 г.

Ключевые слова:

композиционный материал, алюминий, SiC, моделирование, нестационарные условия, температура, деформирование.

АННОТАЦИЯ

Для получения изделий из алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) с требуемым уровнем механических свойств необходима обработка посредством интенсивной деформации. Для моделирования деформационного поведения в нестационарных условиях термодеформационной обработки идентификация модели АМКМ остается актуальной задачей. Один из подходов к описанию текучести материала это использование модели Г.Р. Джонсона и В. Кука. В предлагаемой работе объектом исследования является АМКМ, изготовленный из гранулированного высокопрочного алюминиевого сплава В95 системы Al–Zn–Mg–Cu, армированный 10 % по массе частицами SiC. Целью работы является определение влияния нестационарных термомеханических (давление на заготовку и температура нагрева) условий деформирования на истинную деформацию и скорость деформации композитного материала, а также идентификация модели материала и проверка возможности ее применения для исследования процессов формоизменения в исследуемом диапазоне давлений и температур. Проведено экспериментальное исследование процесса осадки при одноосном сжатии спечённых цилиндрических образцов АМКМ в диапазоне начальных давлений 5,65–7,81 МПа при нагреве до 510, 530 и 550°С. В данном диапазоне получены зависимости степени деформации и средней за процесс скорости деформации. Осуществлена идентификация реологической модели материала. Предложен режим предварительной термомеханической обработки и изготовлен опытный образец. Приведенный режим обеспечил относительно равномерное заполнение композитным материалом полостей штампа. Для подтверждения возможности применения результатов параметрической идентификации модели материала осуществлено имитационное моделирование технологического процесса изготовления опытного образца.

© ПНИПУ

© **Крючков Денис Игоревич** – к.т.н., н.с. лаборатории системного моделирования, e-mail: kru4koff@bk.ru.
Нестеренко Антон Владимирович – к.т.н., с.н.с. лаборатории микромеханики материалов, e-mail: nav@imach.uran.ru.
Залазинский Александр Георгиевич – д.т.н., г.н.с. лаборатории системного моделирования, e-mail: zalaz@list.ru.

Denis I. Kryuchkov – PhD in Technical Sciences, Researcher, e-mail: kru4koff@bk.ru.
Anton V. Nesterenko – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: nav@imach.uran.ru.
Alexander G. Zalazinsky – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: zalaz@list.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MODELING OF AXIAL COMPRESSION OF V95/10% SIC ALUMINUM MATRIX COMPOSITE UNDER NON-STATIONARY THERMOMECHANICAL CONDITIONS

D.I. Kryuchkov, A.V. Nesterenko, A.G. Zalazinsky

Institute of Engineering Science, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 November 2022
Approved: 13 August 2023
Accepted for publication: 31 August 2023

Keywords:

composite material, aluminum, SiC, modeling, unsteady conditions, temperature, deformation.

ABSTRACT

Intensive deformation is necessary to obtain products made of aluminum-matrix composite materials (AMCM) with the required level of mechanical properties. To model the deformation behavior in non-stationary conditions of the thermo-deformation treatment, the identification of the AMCM model remains an urgent task. The use of the Johnson-Cook plasticity model is one of the approaches to describing the material fluidity. This paper aims at studying an AMCM made of granulated high-strength aluminum alloy V95 of the Al–Zn–Mg–Cu system, reinforced with SiC particles 10 % by weight. We investigate how non-stationary thermomechanical (pressure on the workpiece and heating temperature) deformation conditions influence the true deformation and deformation rate of the composite material, as well as identify the material model and verify its application to study the shape changes under certain pressure and temperature ranges. The precipitation process is studied under uniaxial compression of the sintered cylindrical samples of AMCM in the range of the initial pressures of 5.65–7.81 MPa when heated to 510, 530 and 550 °C. In this range, the dependences of the degree of deformation and the average deformation rate for the process are obtained. Identification of the rheological model of the material was carried out. A mode of the preliminary thermomechanical processing is proposed and a prototype is manufactured at an initial pressure of 6.7 MPa on the workpiece and heated to 550 °C in 84 minutes. The above mode provided a relatively uniform filling of the stamp cavities with the composite material. To confirm the possibility of applying the results of the parametric identification of the material model, we simulated the prototype manufacturing process.

© PNRPU

Введение

Композиционные материалы на основе сплавов алюминия, дискретно армированные карбидом кремния (SiC), находят широкое применение в аэрокосмической, электронной и автомобильной промышленности. При изготовлении изделий из алюмоматричных композитов необходимо минимизировать финишную обработку заготовок, при которой происходит интенсивный износ режущего инструмента, поскольку армирование карбидом кремния сплавов алюминия приводит к значительному повышению износостойкости. Для придания композиционным материалам, получаемых методом порошковой металлургии, достаточной для обработки давлением пластичности их необходимо предварительно подвергнуть деформационно-термической обработке. Чаще всего используется горячее выдавливание с высокой степенью деформации [1–3]. Это связано с необходимостью формирования мелкозернистой структуры с равномерным распределением упрочняющих частиц. В процессе такой обработки происходит затекание расплава в микропоры между частицами наполнителя SiC и снижение пористости. Очевидно, температурно-скоростной режим предварительной обработки существенно влияет на возможность повышения пластических свойств и улучшение технологической обрабатываемости за счет реализации фазовых превращений [4–6]. Горячее выдавливание можно заменить альтернативными процессами формоизменения, например всесторонней ковкой, с основной операцией осадки с постепенным нагревом до околосолидусных температур в условиях мягкого нагружения [7]. Такой подход позволяет не ограничиваться получением заготовок только в виде прутков, как в случае выдавливания. При околосолидусных температурах возникает «полужидкое» состояние, деформация в котором способствует экономичности процесса за счет снижения износа деформирующего инструмента [8]. Необходимость применения термодеформационной обработки как в целях проработки структуры, так и технологического формоизменения означает, что расширение знаний о деформировании алюмоматричных композитов в различных условиях, в том числе и нестационарных, имеет существенное прикладное значение.

При разработке технологий термомеханической обработки композитов требуется разработка моделей текучести материала для широкого диапазона термомеханических параметров. В моделях должно быть отражение изменения поведения деформации композита в зависимости от температуры, которое существенно может меняться [9]. Модели деформируемого материала находят применение при моделировании различных технологических процессов от резания до ударного воздействия [10–13].

Согласно литературным данным, можно выделить два основных подхода для формулировки модели пластического течения композитного материала. В первом подходе используется феноменологическое соотноше-

ние Аррениуса и его вариации, основанные на экспериментальном определении энергии активации процесса деформирования, например в работах [11–13]. Уравнения Аррениуса обычно используются в качестве средства для оценки реологического поведения при горячей обработке и для описания корреляции между скоростью деформации, напряжением течения и температурой [14]. Также уравнение успешно применяется при моделировании методом конечных элементов [15]. Другой подход к описанию текучести композитных материалов реализуется с использованием модели Г.Р. Джонсона и В. Кука, которые, выполнив обработку экспериментальных данных для ряда металлических материалов, предложили модель, учитывающую деформационное упрочнение и зависимость напряжения от скорости деформирования и температуры [16; 17]. Также важно отметить исследования, связанные с построением многоуровневых моделей [18; 19], в частности представляет интерес вычислительная модель для алюмоматричного композита В95/SiC на основе двухуровневого структурно-феноменологического подхода [20]. Достаточно много исследований посвящены моделированию процессов деформации алюмоматричных композитных материалов с использованием репрезентативного элементарного объема [21–23]. Немаловажными являются исследования, посвященные верификации модели сопротивления деформации для описания реологического поведения металломатричных композиционных материалов [24], а также модели, учитывающей поврежденность [25]. Все же для моделирования деформационного поведения в нестационарных условиях температурно-деформационной обработки идентификация модели алюмоматричного композитного материала остается актуальной задачей.

В связи с вышеизложенным сформулирована цель работы: определить влияние нестационарных термомеханических (давление на заготовку и температура нагрева) условий деформирования на истинную деформацию и скорость деформации композитного материала на основе высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Zn–Mg–Cu с дискретным армированием 10% SiC, а также идентифицировать модель материала и показать возможность применения этой модели для исследования процессов формоизменения в исследуемом диапазоне давлений и температур.

1. Материал и методика

Объектом исследования является металломатричный композитный материал, изготовленный по порошковой технологии из гранулированного высокопрочного алюминиевого сплава В95 системы Al-6Zn-2,5Mg-2Cu. Материал дискретно армирован 10% по массе частицами SiC. Микроструктура композита в исходном состоянии и после испытаний исследована ранее с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21 в работах [26–28].

Эксперименты проводились в условиях одноосного сжатия (осадки) цилиндрических образцов диаметром 3 мм и высотой 3 мм с использованием специального устройства в шахтной электропечи СШОЛ 11,6/12-М3. Схема устройства представлена на рис. 1. Устройство представляет собой гильзу, внутри которой помещается образец и груз. На торцы заготовки наносили графитовую смазку. Давление на заготовку обеспечивали набором грузов. В зависимости от груза и диаметра заготовки фактические значения начального давления находились в диапазоне 5,65–7,81 МПа. Во время процесса деформирования происходило снижение давления, связанное с увеличением площади контакта. Устройство с образцом вертикально помещали в холодную печь и нагревали до заданной температуры. Температуру нагрева образцов контролировали хромель-алюмелевой термопарой, установленной под образцом.

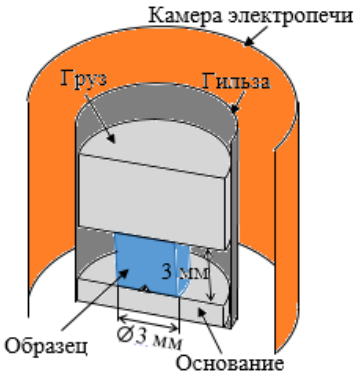


Рис. 1. Схема устройства в разрезе

Fig. 1. Device scheme in the cross-sectional view

После достижения необходимой температуры нагрева следовало извлечение образца. Измерялись: размеры образцов (высота, диаметры нижней и верхней поверхностей) до и после испытаний с использованием микрометра и инструментального микроскопа; общее время испытания **t**. Рассчитывались: истинная деформация $\mathbf{e} = \ln h_0/h$ ($\mathbf{h}_0$, **h** – начальная и конечная высота заготовки) и средняя за процесс скорость деформации $\xi^* = \mathbf{e}/\mathbf{t}$. Нагрев образцов проводился до температур 510, 530 и 550 °С. Режимы нагрева образцов для каждого случая показаны на рис. 2; максимальная длительность нагрева до заданной температуры составляла 12 мин.

Для имитационного моделирования технологических процессов изготовления изделий из алюмоматричного композитного материала В95/10% SiC в нестационарных термомеханических условиях (при изменении температуры нагрева и действующего на образец давления) была выбрана модель Джонсона – Кука [16]. Данная модель позволяет учитывать деформационное упрочнение и зависимость напряжения от скорости деформирования и температуры. Модель Джонсона – Ку-

ка используется в известных программных продуктах конечно-элементного моделирования.

$$\sigma = \left[\mathbf{A} + \mathbf{B}\varepsilon^{\mathbf{n}}\right] \cdot \left[1 + \mathbf{C}\ln\dot{\varepsilon}^{*}\right] \cdot \left[1 - \mathbf{T}^{*\mathbf{m}}\right], \qquad (1)$$

где ε – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}^{*} = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ – безразмерная скорость пластической деформации (принято, что $\dot{\varepsilon}_0 = 1{,}0$ 1/с), T^{*} – гомологическая температура (принимает значения от 0 до 1, в зависимости от текущей температуры **T** температуры плавления $\mathbf{T}_{пл}$ и переходной температуры $\mathbf{T}_{переход}$, определяемой как температуры, при которой или ниже которой нет температурной зависимости предела текучести. **A**, **B**, **n**, **C**, **m** – константы материала; выражение в первом наборе скобок дает напряжение как функцию деформации для $\dot{\varepsilon}^{*} = 1{,}0$ и $\mathbf{T}^{*} = 0$.

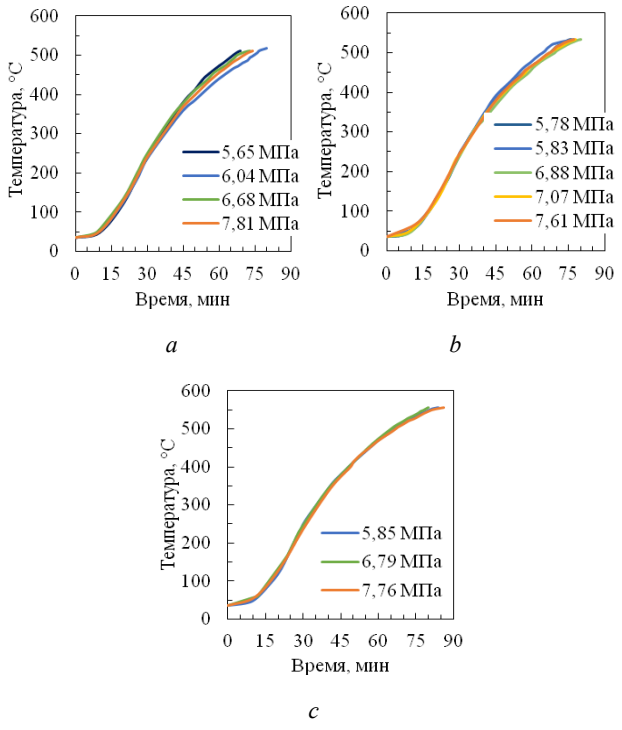


Рис. 2. Режимы нагрева образцов композита B95/10% SiC до температур: *a* – 510; *b* – 530; *c* – 550 °С. В легенде графиков указаны значения давлений на образец, действующих в начальный момент времени

Fig. 2. Heating conditions of V95/10% SiC composite samples to temperatures: *a* – 510; *b* – 530; *c* – 550 °C. The legend of the graphs shows the values of the pressures on the sample acting at the initial time

Для параметрической идентификации модели Джонсона – Кука использовалась методика, описанная в работе [16]. Для определения параметров **A**, **B**, **n**, **C** были использованы данные испытаний на осадку цилиндрических образцов в исходном состоянии при комнатной температуре [7] и при температуре 400 °С при нескольких фиксированных значениях скорости деформации [29]. Для определения $\mathbf{T}_{переход}$ и **m** использовался метод подбора и данные, полученные в ходе экспериментов.

Методом конечных элементов с применением связного анализа (coupled thermal-stress analysis) в Abaqus/Standard CAE-системы Abaqus осуществлено имитационное моделирование. Режим деформирования соответствовал экспериментальным данным. Нагрузка задавалась в виде силы, действующей на пуансон. Зависимость температуры нагрева от времени задавалась в табличной форме. Основным допущением, используемым в статье, считается, что композитный материал на макроуровне ведет себя как изотропный материал с усредненными по объему свойствами. Задача решалась в осесимметричной постановке. Инструмент задавался как абсолютно жесткий. Контактное взаимодействие между заготовкой и инструментом описывалось условием трения Амантона – Кулона [30], коэффициент трения $\mu = 0{,}1$.

2. Результаты и их обсуждение

В результате термомеханических испытаний установлено влияние температур нагрева (510, 530 и 550 °С) и начального давления на образец 5,65–7,81 МПа на истинную деформацию образцов из алюмоматричного композита B95/10% SiC в нестационарных условиях (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные и результаты испытаний

Table 1

Initial data and test results

T, °C	$\mathbf{P}_0$, МПа	**t**, мин	**e**	ξ*, 1/с
510	5,65	69	0,08	$1{,}9\cdot10^{-5}$
510	6,04	80	0,19	$4\cdot10^{-5}$
510	6,68	73	0,11	$2{,}5\cdot10^{-5}$
510	7,81	74	0,33	$7{,}4\cdot10^{-5}$
530	5,78	76	0,52	$1{,}1\cdot10^{-4}$
530	5,83	77	0,51	$1{,}1\cdot10^{-4}$
530	6,88	80	0,96	$2\cdot10^{-4}$
530	7,07	78	0,77	$1{,}7\cdot10^{-4}$
530	7,61	77	0,95	$2{,}1\cdot10^{-4}$
550	5,85	84	0,99	$2\cdot10^{-4}$
550	6,79	80	1,15	$2{,}4\cdot10^{-4}$
550	7,76	86	1,16	$2{,}3\cdot10^{-4}$

Примечание: **T** – конечная температура образца в процессе нагрева, $\mathbf{P}_0$ – начальное давление на образец, **t** – общее время испытания, **e** – истинная деформация, ξ* – усреднённое за процесс осадки значение скорости деформации.

Увеличение величины истинной деформации происходит при увеличении температуры нагрева и начального давления на образец. Для диапазона начальных давлений 5,65–7,81 МПа при нагреве до температуры 510 °С образцы деформировались незначительно, **e** изменялось от 0,08 до 0,33. Наиболее интенсивный прирост степени деформации в этом же диапазоне давлений происходит при нагреве до 530 и 550 °С. При

550 °C значение **e** изменяется в пределах 0,99–1,16. Из приведенных данных следует, что режим нагрева имеет существенное значение. Так, при температуре нагрева до 510 °C за 80 мин и воздействии более низкого начального давления 6,04 МПа значение истинной деформации **e** = 0,19, что выше, чем при $\mathbf{P}_0$ = 6,68 МПа, но меньше время нагрева **t** = 73 мин; аналогично при $\mathbf{P}_0$ = = 6,88 МПа и нагреве до 530 °C: **t** = 80 мин, **e** = 0,96, а при $\mathbf{P}_0$ = 7,61 МПа и **t** = 77 мин **e** = 0,95. То есть незначительная выдержка (3–7 мин) при температуре может способствовать развитию деформации, такой же, как в случае воздействия большего начального давления, но без выдержки. Вместе с тем в работе [31] утверждается, что проведение длительной выдержки (60 мин и более) нецелесообразно.

В испытываемых термомеханических условиях одноосного сжатия все цилиндрические образцы деформировались без разрушения (рис. 3). Как отмечено в работах [7; 18], этому способствуют фазовые превращения в алюминиевой матрице. В частности, при нагреве выше 470 °C происходит растворение интерметаллидов, облегчающее процессы скольжения дислокаций в ГЦК-кристаллической решетке матрицы при деформации. Эвтектическое превращение $\alpha + \mathbf{S}(Al_2CuMg) \rightarrow \mathbf{L}$ приводит к возникновению жидкой фазы в локальных объемах; при этом сохраняется жесткость композита в целом, что в условиях интенсивной деформации способствует залечиванию микропор в зонах скоплений частиц наполнителя SiC. В результате увеличивается прочность связей матрицы с наполнителем за счет их диффузионного взаимодействия и образования соединения Al_4SiC_4.

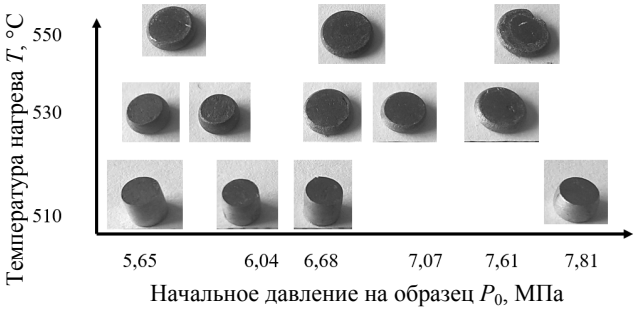


Рис. 3. Макроскопическая морфология образцов, осаженных при различных температурах и начальных давлениях

Fig. 3. Macroscopic morphology of samples upset at different temperatures and initial pressures

Полученные в ходе экспериментов истинные деформации были использованы при определении величин $\mathbf{T}_{\text{переход}}$ и **m**. В результате идентификации были установлены параметры модели Джонсона — Кука, которые приведены в табл. 2. Теплофизические свойства были взяты из работы [26].

Результаты моделирования, полученные при использовании найденных параметров модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при осадке композита В95/10% SiC при нагреве до температур 510, 530 и 550 °C. Для статистической проверки результатов использовался критерий «хи-квадрат». Статистический анализ показал, что нет значимого различия между двумя совокупностями между экспериментальными данными и данными, полученными с помощью моделирования. Однако моделирование процесса осадки при температурах нагрева 510 °C дает заниженную оценку истиной деформации, по сравнению с экспериментальными данными (рис. 4). Наиболее точно модель описывает деформационное поведение композита при нагреве до температуры 550 °C и начальных давлениях 5,65–7,81 МПа.

Таблица 2

Параметры модели Джонсона – Кука

Table 2

The Johnson – Cook plasticity model

A, МПа	**B**, МПа	**n**	**C**	**m**	$\dot{\varepsilon}_0^*$, 1/с	$\mathbf{T}_{\text{пл}}$, °C	$\mathbf{T}_{\text{переход}}$, °C
100	370	0,07	0,075	0,004	1	657	500



Рис. 4. Значения истинной деформации в зависимости от начального давления на образец при температурах нагрева 510, 530 и 550 °C: Э. – эксперимент; М. – модель

Fig. 4. Dependence of true deformation on initial pressure on the sample at heating temperatures of 510, 530 and 550 °C: E – experiment; M – model

С учетом полученных данных в лабораторных условиях осуществлено пробное изготовление фасонных заготовок деталей. Реализованный способ показал возможность совместить формоизменение с деформационно-термической обработкой. На рис. 5 показан опытный образец детали. Исходная заготовка представляла собой цилиндрический образец высотой 3,09 мм, диаметром 3,04 мм. В качестве штампа использовалась гайка с винтовой резьбой М4. Этот выбор обусловлен тем, что при формировании рельефа резьбы материал испытывает существенные и неоднородные локальные деформации, отчасти, при воздействии растягивающих растяжений. В таких условиях необходимо, чтобы термомеханические условия формоизменения компенсировали невысо-

кие исходные пластические свойства материала и обеспечивали равномерное распределение упрочняющих частиц [28]. Опытный образец получен при начальном давлении на заготовку 6,7 МПа и нагреве до 550 °С за 84 мин. Приведенный режим обеспечил формирование рельефа резьбы с относительно равномерным заполнением композитным материалом полостей штампа. Лишь в нескольких участках наблюдается неполное заполнение штампа, размер участков составляет не более 100 мкм. На отштампованном профиле винтовой резьбы признаков разрушения визуально не обнаружено.

Для подтверждения возможности применения результатов параметрической идентификации модели деформируемого композита осуществлено имитационное моделирование технологического процесса изготовления опытного образца детали.

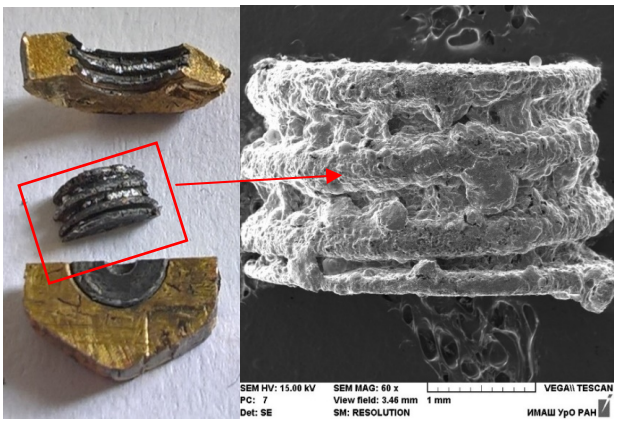
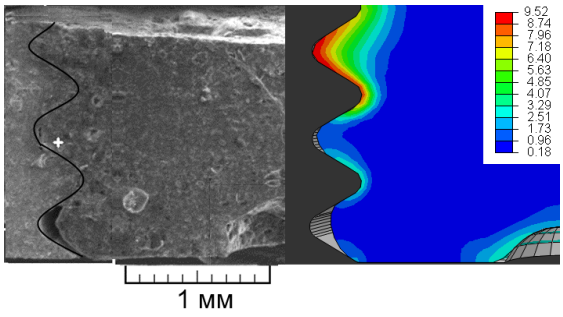


Рис. 5. Образец детали с винтовой резьбой из В95/10% SiC, полученный в нестационарных термомеханических условиях

Fig. 5. A sample of a part with a screw thread made of V95/10% SiC obtained in non-stationary thermomechanical conditions

На рис. 6 показано, что пластическая деформация равномерно распределена по объему заготовки. За счет сложной формы боковой поверхности и использования закрытого штампа в заготовке по всему сечению действовали преимущественно напряжения сжатия, однако в вершинах витков резьбы действовали и растягивающие радиальные напряжения. Уровень пластических деформаций максимален в первом витке, но в общем распределение по сечению приближается к однородному. Можно утверждать, что исследуемое напряженно-деформированное состояние благоприятно сказывается на формировании структуры с равномерным распределением упрочняющих частиц. В процессе обработки происходит затекание расплава в микропоры между частицами наполнителя SiC и соответственно происходит улучшение механических характеристик.

На рис. 6 видно, что результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным о заполнении материалом полостей штампа. На основании этого сделано заключение об адекватности модели для проведения расчетов и анализа процессов изготовления заготовок и изделий.



a *b*

Рис. 6 Заполнение материалом В95/10% SiC штампа после деформации (*a*) и распределение эквивалентных пластических деформаций (*b*)

Fig. 6. The result of filling the die with B95/10% SiC material after deformation (*a*) and the distribution of equivalent plastic deformations (*b*)

Заключение

Экспериментальные данные и результаты имитационного моделирования деформационного поведения алюмоматричного композита В95/SiC в условиях воздействия давлений на образец 5,65–7,81 МПа и нагрева заготовок от комнатной до температур 510–550 °С позволяют утверждать следующее:

1. Увеличение температуры нагрева и начального давления на образец приводит к росту величины истинной деформации. Наиболее интенсивный прирост истинной деформации происходит в случаях нагрева до 530 и 550 °С. Помимо температуры, до которой нагревается образец, существенное влияние на деформацию оказывает длительность повышения температуры до заданной величины.

2. Короткая выдержка в интервале 3–7 мин нагретых образцов способствует росту деформации заготовок до значений, полученных без выдержки, но с действующим на образцы большем начальном давлении.

3. Установлена целесообразность описания деформационного поведения композита В95/10% SiC при околосолидусных температурах 0,8–0,86 T_{melt} (510–560 °С) с использованием модели Джонсона – Кука, которая позволяет учесть деформационное упрочнение и зависимость напряжения от скорости деформирования и температуры.

4. Для получения изделий сложной формы из спеченного композита В95/10% SiC целесообразно проведение предложенной деформационно-термической обработки, включающей нагрев с низкой скоростью предварительно нагруженного образца. В этом случае, при достижении температур 0,8–0,86 T_{melt} в алюминиевой матрице композита происходят фазовые превращения, способствующие протеканию деформации композита без разрушения.

5. Реализовано пробное изготовление фасонной заготовки детали, где сформирована структура с равномерным распределением упрочняющих частиц.

6. Проведенное моделирование процесса подтверждает адекватность идентифицированной модели Джонсона – Кука для композита B95/10% SiC и показывает, что реализуемое напряжено-деформированное состояние в данном случае благоприятно влияет на структуру материала детали. Пластическая деформация равномерно распределена по объему заготовки. За счет сложной формы боковой поверхности и использования закрытого штампа в заготовке по всему сечению действовали преимущественно напряжения сжатия, однако в вершинах витков резьбы действовали и растягивающие радиальные напряжения. Уровень пластических деформаций максимален в первом витке, но в общем распределение по сечению приближается к однородному.

Библиографический список

1. Исследование структуры и свойств металлического композиционного материала системы Al–Zn–Mg–Cu/SiC / Е.И. Курбаткина, Д.В. Косолапов, А.В. Гололобов, А.А. Шавнев // Цветные металлы. – 2019. – № 1. – С. 40–45. DOI: 10.17580/tsm.2019.01.06

2. Čadek J., Kuchařova K., Zhu S.J. High temperature creep behaviour of an Al–8.5Fe–1.3V–1.7Si alloy reinforced with silicon carbide particulates // Mater. Sci. Eng. A. – 2000. – Vol. 283, № 1–2. – P. 172–180.

3. Ma Z.Y., Tjong S.C. High-temperature creep behaviour of SiC particulate reinforced Al–Fe–V–Si alloy composite // Mater. Sci. Eng. A. – 2000. – Vol. 278, № 1–2. – P. 5–15.

4. Phase Stability and Interface Reactions in the Al-SiC System / D. Lee, M.D. Vaudin, C.A. Handewerker, U.R. Katter // Mater. Res. Symp. Proc. – 1988. – Vol. 120. – P. 357–365.

5. Пугачева Н.Б., Мичуров Н.С., Быкова Т.М. Структура и свойства композиционного материала Al/SiC // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 6. – С. 654. DOI: 10.7868/S0015323016060115

6. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2001. – 416 с.

7. Влияние всесторонней ковки в условиях кратковременной ползучести на структуру и механические свойства алюмоматричного композита Al7075/10SiCp / Д.И. Крючков [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 10. – С. 1054–1064. DOI: 10.31857/S0015323021100065

8. Shen Q., Lee T.C., Lau W.S. A finite-element analysis of temperature distributions in spade drilling // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 66, № 1–3. – P. 76–84.

9. Investigation of compression of SiCw/6061Al composites around the solidus of the matrix alloy / G.S. Wang, L. Geng, Z.Z. Zheng, D.Z. Wang, C.K. Yao // Materials Chemistry and Physics. – 2001. – Vol. 70, № 2. – P. 164–167. DOI: 10.1016/S0254-0584(00)00487-9.

10. Sun W., Duan C., Yin W. Development of a dynamic constitutive model with particle damage and thermal softening for Al/SiCp composites // Composite Structures. – 2020. – Vol. 236. – P. 111856. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111856

11. Constitutive flow behavior and hot workability of powder metallurgy processed 20 vol.%SiCP/2024Al composite / J.C. Shao, B.L. Xiao, Q.Z. Wang, Z.Y. Ma, Y. Liu, K. Yang // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527, № 29–30. – С. 7865–7872. DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.080

12. Hot deformation behaviors of 35% SiCp/2024Al metal matrix composites / S.M. Hao, J.P. Xie, A.Q. Wang, W.Y. Wang, J.W. Li, H.L. Sun // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2014. – Vol. 24, № 8. – P. 2468–2474. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63372-0

13. Constitutive flow behavior and microstructural evolution of 17 vol% SiCp/7055Al composite during compression at elevated temperature / B. Tang, Wang H., Jin P., X. Jiang // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, № 3. – P. 6386–6396. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.010

14. Sellars C.M., McTegart W.J. On the mechanism of hot deformation // Acta Mater. – 1966. – Vol. 14. – P. 1136–1138. DOI: 10.1016/0001-6160(66)90207-0

15. Constitutive flow behaviour and finite element simulation of hot rolling of SiCp/2009Al composite / L. Zhou, Z.Y. Huang, C.Z. Wang, X.X. Zhang, B.L.Xiao, Z.Y. Ma // Mechanics of Materials. – 2016. – Vol. 93. – P. 32–42. DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.10.010

16. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. 7th Int. Symp. on BuNistics. – Netherlands, 1983. – P. 541–547

17. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engng Fract. Mech. – 1985. – Vol. 21, № 1. – P. 31–48.

18. Simulation of anisotropic load transfer and stress distribution in sicp/Al composites subjected to tensile loading / J.F. Zhang, X.X. Zhang, Q.Z. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma // Mechanics of Materials. – 2018. – Vol. 122. – P. 96–103. DOI: 10.1016/j.mechmat.2018.04.011.

19. Three-dimensional multi-particle FE model and effects of interface damage, particle size and morphology on tensile behavior of particle reinforced composites / L. Weng, T. Fan, M. Wen, Y. Shen // Composite Structures. – 2019. – Vol. 209. – P. 590–605. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.008

20. A Computational Model of V95/sicp (7075/ Sicp) Aluminum Matrix Composite Applied to Stress-Strain State Simulation under Tensile, Compressive and Shear Loading Conditions / S.V. Smirnov, A.V. Konovalov, M.V. Myasnikova, Yu.V. Khalevitsky, A.S. Smirnov, A.S. Igumnov // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 6. – P. 16–27. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.016-027

21. Simulations of deformation and damage processes of SiCp/Al composites during tension / J.F. Zhang, X.X. Zhang, Q.Z. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma // Journal of Materials Science & Technology. – 2018. – Vol. 34, iss. 4. – P. 627–634. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.09.005

22. 3D Microstructure-based finite element modeling of deformation and fracture of SiCp/Al composites / J. Zhang, Q. Ouyang, Q. Guo, Z. Li, G. Fan, Y. Su, L. Jiang, E.J. Lavernia, J.M. Schoenung, D. Zhang // Composites Science and Technology. – 2016. – Vol. 123. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.11.014

23. Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites / Y. Su, Q. Ouyang, W. Zhang, Z. Li, Q. Guo, G. Fan, D. Zhang // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 597. – P. 359–369. DOI: 10.1016/j.msea.2014.01.024

24. Смирнов А.С., Коновалов А.В. Моделирование реологического поведения и формирования микроструктуры ме-

талломатричных композитов системы Al-SIC в условиях высоких температур деформаций // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Уфа, 2019. – С. 1458–1460.

25. Using the Instrumented Indentation Technique to Determine Damage in Sintered Metal Matrix Composites after High-Temperature Deformation / A.S. Smirnov, E. Smirnova, A. Konovalov, V. Kanakin // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11(22). – 10590. DOI: 10.3390/app112210590

26. Структура и теплофизические свойства алмоматричных композитов / Н.Б. Пугачева, Н.С. Мичуров, Е.И. Сенаева, Т.М. Быкова // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117. – С. 1188–1195.

27. Effect of Heat Treatment on the Structure and Phase Composition of Aluminum Matrix Composites Containing Silicon Carbide / N.B. Pugacheva, I.Yu. Malygina, N.S. Michurov, E.I. Senaeva, N.P. Antenorova // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 6. – P. 28-36. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.028-036

28. Исследование кратковременной высокотемпературной ползучести алюмоматричного композита Al–6Zn–2.5Mg–2Cu/10SiCp / Н.Б. Пугачева [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 8. – С. 838–844. DOI: 10.31857/S0015323021080118

29. Smirnov A.S., Konovalov A.V., Muizemnek O.Y. Simulating the rheological behaviour of an AlMg6/10% SiC metal matrix composite under high-temperature deformation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 709, № 3. – P. 033114. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033114

30. Журавлев В.Ф. 500 лет истории закона сухого трения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2014. – № 2(53). – С. 21–31.

31. Экспериментальное исследование кратковременной неустановившейся ползучести алюмоматричного композита в условиях одноосного сжатия / С.В. Смирнов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 98–105.

References

1. Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V., Gololobov A.V. Shavnev A.A., Issledovaniye struktury i svoystv metallicheskogo kompozitsionnogo materiala sistemy Al-Zn-Mg-Cu/SiC [Study of the structure and properties of a metal composite material of the Al-Zn-Mg-Cu/SiC system]. *Tsvetnyye metally*, 2019, №1, pp.40-45.

2. Čadek J., Kuchařova K., Zhu S.J. High temperature creep behaviour of an Al–8.5Fe–1.3V–1.7Si alloy reinforced with silicon carbide particulates. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, Vol. 283, No 1-2, pp. 172-180.

3. Ma Z.Y., Tjong S.C. High-temperature creep behaviour of SiC particulate reinforced Al–Fe–V–Si alloy composite. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, Vol. 278, No 1-2, P. 5-15.

4. Lee D., Vaudin M.D., Handewerker C.A., Katter U.R. Phase Stability and Interface Reactions in the Al-SiC System. *Mater. Res. Symp. Proc.*, 1988. Vol. 120, pp. 357-365.

5. Pugacheva, N. B., Michurov, N. S., Bykova, T. M. Structure and properties of the Al/SiC composite material. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, Vol. 117, No 6, pp. 634-640.

6. Kolachev B.A., Yelagin V.I., Livanov V.A. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS, 2001, 416 p.

7. Kryuchkov, D.I., Nesterenko, A.V., Smirnov, S.V., Pugacheva, N.B., Vichuzhanin, D.I., & Bykova, T.M. Influence of All-Round Forging under Short-Term Creep Conditions on the Structure and Mechanical Properties of the Al7075/10SiCp Composite with an Aluminum Matrix. *Physics of Metals and Metallography*, 2021, Vol. 122, No 10, pp. 981-990, doi: 10.1134/S0031918X21100069

8. Shen Q., Lee T.C, Lau W.S. A finite-element analysis of temperature distributions in spade drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, Vol 66, No 1-3, pp.76-84.

9. Wang G.S., Geng L., Zheng Z.Z., Wang D.Z., Yao C.K. Investigation of compression of SiCw/6061Al composites around the solidus of the matrix alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2001, Vol. 70, No 2, pp. 164-167, doi: 10.1016/S0254-0584(00)00487-9.

10. Sun W., Duan C., Yin W. Development of a dynamic constitutive model with particle damage and thermal softening for Al/SiCp composites. *Composite Structures*, 2020, Vol. 236, No 111856, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111856

11. Shao, J. C., Xiao, B. L., Wang, Q. Z., Ma, Z. Y., Liu, Y., Yang, K. Constitutive flow behavior and hot workability of powder metallurgy processed 20 vol.%SiCP/2024Al composite. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, Vol. 527, No. 29-30, pp. 7865-7872, doi:10.1016/j.msea.2010.08.080

12. Hao, S. M., Xie, J. P., Wang, A. Q., Wang, W. Y., Li, J. W., & Sun, H. L. Hot deformation behaviors of 35% SiCp/2024Al metal matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, Vol. 24, No 8, pp. 2468-2474, doi: 10.1016/S1003-6326(14)63372-0

13. Tang, B., Wang, H., Jin, P., Jiang, X. Constitutive flow behavior and microstructural evolution of 17 vol% SiCp/7055Al composite during compression at elevated temperature. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, Vol. 9, No 3, pp. 6386-6396, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.010

14. Sellars C.M., McTegart W.J. On the mechanism of hot deformation. *Acta Mater.*, 1966, Vol. 14, pp.1136-1138, doi: 10.1016/0001-6160(66)90207-0

15. Zhou L., Huang Z.Y., Wang C.Z., Zhang X.X., Xiao B.L., Ma Z.Y. Constitutive flow behaviour and finite element simulation of hot rolling of SiCp/2009Al composite. *Mechanics of Materials*, 2016, Vol. 93, pp. 32-42, doi: 10.1016/j.mechmat.2015.10.010.

16. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proc. 7th Int. Symp. on BuNistics*. Netherlands, 1983, pp. 541-547

17. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engng Fract. Mech.*, 1985, Vol. 21, No 1, pp. 31–48.

18. Zhang J.F., Zhang X.X., Wang Q.Z., Xiao B.L., Ma Z.Y. Simulation of anisotropic load transfer and stress distribution in sicp/Al composites subjected to tensile loading. *Mechanics of Materials*, 2018, Vol. 122, pp. 96-103, doi: 10.1016/j.mechmat.2018.04.011.

19. Weng L., Fan T., Wen M., Shen Y. Three-dimensional multi-particle FE model and effects of interface damage, particle size and morphology on tensile behavior of particle reinforced composites. *Composite Structures*, 2019, Vol. 209, pp. 590-605, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.008.

20. Smirnov S.V., Konovalov A.V., Myasnikova M.V., Khalevitsky Yu.V., Smirnov A.S., Igumnov A.S. A Computational

Model of V95/sicp (7075/ Sicp) Aluminum Matrix Composite Applied to Stress-Strain State Simulation under Tensile, Compressive and Shear Loading Conditions. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, Iss. 6, pp. 16-27, doi: 10.17804/2410-9908.2017.6.016-027 (http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6_133.html)

21. Zhang J.F., Zhang X.X., Wang Q.Z., Xiao B.L., Ma Z.Y. Simulations of deformation and damage processes of SiCp/Al composites during tension. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, Vol. 34, Iss. 4, pp. 627-634, doi: 10.1016/j.jmst.2017.09.005.

22. Zhang J., Ouyang Q., Guo Q., Li Z., Fan G., Su Y., Jiang L., Lavernia E.J., Schoenung J.M., Zhang D. 3D Microstructure-based finite element modeling of deformation and fracture of SiCp/Al composites. *Composites Science and Technology*, 2016, Vol. 123, pp. 1-9, doi: 10.1016/j.compscitech.2015.11.014.

23. Su Y., Ouyang Q., Zhang W., Li Z., Guo Q., Fan G., Zhang D. Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*., 2014, Vol. 597, pp. 359-369, doi: 10.1016/j.msea.2014.01.024

24. Smirnov A.S., Konovalov A.V. Modelirovanie reologicheskogo povedeniia i formirovaniia mikrostruktury metallomatrichnykh kompozitov sistemy Al-SIC v usloviiakh vysokikh temperatur deformatsii [Modeling of rheological behavior and microstructure formation of metal matrix composites of the Al-SIC system under high deformation temperatures]. *XII Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki* (XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics). Ufa, 2019, pp. 1458-1460

25. Smirnov A.S., Smirnova E., Konovalov A, Kanakin V. Using the Instrumented Indentation Technique to Determine Damage in Sintered Metal Matrix Composites after High-Temperature Deformation. *Applied Sciences*, 2021, 11(22), 10590, https://doi.org/10.3390/app112210590

26. Pugacheva N.B., Michurov N.S., Senaeva E.I., Bykova T.M. Structure and thermophysical properties of aluminum-matrix composites. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, Vol. 117, No 11. pp. 1144-1151.

27. Pugacheva N.B., Malygina I.Yu., Michurov N.S., Senaeva E.I., Antenorova N.P. Effect of Heat Treatment on the Structure and Phase Composition of Aluminum Matrix Composites Containing Silicon Carbide. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, Iss. 6, pp. 28-36, doi: 10.17804/2410-9908.2017.6.028-036. (http://dream-journal.org/issues/2017-6/2017-6_161.html)

28. Pugacheva N.B., Kryuchkov D.I., Nesterenko A.V., Smirnov S.V., Shveikin V.P. Studying the Short-Term High-Temperature Creep in the Al–6Zn–2.5Mg–2Cu/10SiCp Aluminum Matrix Composite. *The Physics of Metals and Metallography*, 2021, Vol. 122, No 8, pp. 782-788, doi: 10.1134/S0031918X21080111.

29. Smirnov A.S., Konovalov A.V., Muizemnek O.Y. Simulating the rheological behaviour of an AlMg6/10% SiC metal matrix composite under high-temperature deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709. No 3. – P. 033114, doi: 10.1088/1757-899X/709/3/033114

30. Zhuravlev V. F. 500 let istorii zakona sukhogo treniya [500 years of history of the dry friction law]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences,* 2014, no. 2(53), pp. 21-31.

31. Smirnov S.V., Kryuchkov D.I., Nesterenko A.V., Berezin I.M., Vichuzhanin D.I. Experimental study of short-term transient creep of the Al/SiC metal-matrix composite under uniaxial compression. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 98-105. doi: 10.15593/perm.mech/2018.4.09

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН (№ АААА-А18-118020790142-9).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Mechanical Engineering named after E.S. Gorkunov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (No. AAAA-A18-118020790142-9).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.