

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 539.37
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.010

ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Татьяна Андреевна Ковалевская^{1†}, Ольга Ивановна Данейко²

^{1,2} Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634034, Томск, Россия

¹ takov47@mail.ru[†]

² olya_dan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4566-2123>

Аннотация. В работе методом математического моделирования получена зависимость напряжения течения от температуры деформации дисперсно-упрочнённых кристаллических материалов с алюминиевой матрицей и некогерентными частицами упрочняющей фазы. Исследования проводились для материалов с тремя фиксированными значениями объёмной доли упрочняющей фазы (10^{-4} , 0.01, 0.1%) при двух размерах частиц (10 и 20 нм). Показано, что увеличение размеров некогерентных частиц при фиксированной объёмной доле упрочняющей фазы сопровождается уменьшением напряжения течения при всех температурах деформации. В материале с частицами размером 10 нм в составе дислокационной структуры присутствуют призматические дислокационные петли и матричные сдвигобразующие дислокации; при увеличении размера частиц до 20 нм в состав дислокационного ансамбля могут дополнительно входить дислокационные дипольные конфигурации. Выявлено, что сплав с меньшим содержанием упрочняющих частиц может проявлять более высокие прочностные свойства по сравнению со сплавом с более высоким содержанием упрочняющих некогерентных частиц, это определяется содержанием дислокационных диполей в материале с меньшей объёмной долей упрочняющей фазы.

Ключевые слова: дисперсно-упрочнённые материалы, наноразмерные частицы, математическое моделирование, напряжение течения, плотность дислокаций.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2020-0004.

Для цитирования: Ковалевская Т.А., Данейко О.И. Влияние наноразмерных некогерентных дисперсных частиц на температурное поведение напряжения течения кристаллических сплавов на основе алюминия // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 1. С. 85–92. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.010.

Original article

INFLUENCE OF NANOSIZED INCOHERENT DISPERSED PARTICLES ON THE TEMPERATURE BEHAVIOR OF FLOW STRESS IN ALUMINUM-BASED CRYSTALLINE ALLOYS

Tatiana A. Kovalevskaya^{1†}, Olga I. Daneyko²

^{1,2} Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2, Tomsk, 634034, Russia

¹ takov47@mail.ru[†]

² olya_dan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4566-2123>

Abstract. In this work, the dependence of the flow stress on the deformation temperature of dispersion-strengthened crystalline materials with an aluminum matrix and incoherent particles of the hardening phase is obtained by mathematical modeling. The studies were carried out for materials with three fixed values of the volume

fraction of the hardening phase (10^{-4} , 0.01 and 0.1%) at two particle sizes (10 and 20 nm). It is shown that an increase in the size of incoherent particles at a fixed volume fraction of the hardening phase is accompanied by a decrease in the flow stress at all deformation temperatures. In a material with particles 10 nm in size, the dislocation structure contains prismatic dislocation loops and matrix shear-forming dislocations. As the particle size increases to 20 nm, the dislocation ensemble can additionally include dislocation dipole configurations. It has been found that an alloy with a lower content of strengthening particles can exhibit higher strength properties compared to an alloy with a higher content of strengthening incoherent particles. This is determined by the content of dislocation dipoles in the material with a lower volume fraction of the strengthening phase.

Keywords: plastic deformation, dispersion-hardened materials, nanoscale particles, mathematical model, flow stress, dislocation density.

Acknowledgements: The work has been conducted with the financial support of the Government Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. FEMN-2020-0004).

For citation: Kovalevskaya, T. A. & Daneyko, O. I. (2022). Influence of nanosized incoherent dispersed particles on the temperature behavior of flow stress in aluminum-based crystalline alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(19), 85–92. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.010.

Введение

Использование композиционных материалов, состоящих из высокопрочных наполнителей (дисперсных фаз) и пластичных связующих (матриц), позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики и обеспечить требуемый уровень надежности и долговечности технологических устройств, применяемых в энергетике, химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Дисперсно-упрочненные материалы, в матрице которых распределены наноразмерные частицы, проявляют уникальные свойства по сравнению с традиционными сплавами [1-3]. Дисперсные частицы наполнителя упрочняют материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении, что затрудняет пластическую деформацию. Упрочняющие частицы в соответствии с теорией Орована препятствуют движению дислокаций и тем самым способствуют повышению всех прочностных и деформационных свойств [4-6].

Дисперсно-упрочненные материалы на основе алюминия обладают повышенными прочностными характеристиками и жаропрочностью, что является решающим фактором для применения их в авиастроении и космической промышленности. В настоящее время чрезвычайно актуальным является исследование влияния нанодисперсных упрочняющих частиц на свойства алюминиевых сплавов, что является основой для создания новых материалов с уникальными свойствами. Прочностные характеристики дисперсно-упрочненных материалов определяются формой, размером частиц, а также расстоянием между ними [7-9]. Варьирование состава матрицы, раз-

мера частиц и их объемной доли позволяет получить материалы, обладающие требуемыми свойствами [10-12].

В статье [13] методом молекулярной динамики проведено исследование влияния примесных атомов на диффузию по границам зерен. Показано, что примесные атомы сильнее деформируют кристаллическую решетку, в связи с чем создают дополнительный свободный объем вдоль границ зерен, что приводит к росту диффузионной проницаемости. Моделирование зарождения дислокационных петель на поверхности цилиндрических пор в ГЦК-кристалле при внешнем воздействии проведено в работе [14]. Результаты исследований показали, что при создании сдвиговой деформации на поверхности поры начинают зарождаться дислокационные петли. Повышение температуры приводит к схлопыванию пор под воздействием ударных волн. Исследование характеристик дислокационных субструктур монокристаллов проведено в работе [15]. Авторами выявлены последовательности видоизменения дислокационных субструктур по мере удаления от поверхности образца внутрь кристалла. В работе [16] теоретически проанализировано влияние точечных дефектов на величину деформирующего напряжения при высокоскоростной деформации наноматериалов. Численные оценки показывают, что это влияние может быть весьма существенным при высокой концентрации примеси.

В данной работе методом математического моделирования исследуется влияние наноразмерных некогерентных дисперсных частиц на формирование прочностных свойств кристаллических сплавов на алюминиевой основе в зави-

симости от температуры деформации. Для исследования использовалась математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочнённых материалов с ГЦК-матрицей и некогерентными недеформируемыми сферическими частицами [17].

Математическая модель пластической деформации

Физическая модель формирования прочностных свойств дисперсно-упрочнённых кристаллических материалов, разработанная в рамках концепции упрочнения и отдыха [18], позволяет анализировать влияние на дефектную структуру и напряжение течения как внутренних исходных параметров материала (свойств и размеров частиц, их объёмной доли), так и внешних воздействий – температуры, скорости деформации.

Ранее [19, 20] была детально исследована дефектная структура, которая формируется в таких материалах при изменении температуры деформации, проведён детальный анализ эволюции в процессе деформации дислокационной подсистемы: матричных (сдвигообразующих) дислокаций, плотность которых обозначена ρ_m , призматических петель вакансионного и межузельного типа (плотность которых обозначена ρ_p^v и ρ_p^i соответственно), дипольных дислокационных конфигураций вакансионного и межузельного типа (плотность ρ_d^v и ρ_d^i соответственно) в зависимости от температуры.

Система уравнений модели пластической деформации дисперсно-упрочнённых материалов, описывающая эволюцию составляющих дислокационной структуры, записана в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_m}{da} &= (1 - \omega_s P_{as}) \frac{F}{Db} - \frac{2b}{\dot{a}} ((1 - \omega_s) \rho_m^2 \min(r_a, \rho_m^{-1/2}) (c_{2v} Q_{2v} + c_{1v} Q_{1v} + c_i Q_i) + \\ &+ \alpha \sqrt{\rho} (\rho_p^v (c_{1v} Q_{1v} + c_{2v} Q_{2v}) + \rho_p^i c_i Q_i) + \frac{1}{r_a} (\rho_d^i c_i Q_i + \rho_d^v (c_{1v} Q_{1v} + c_{2v} Q_{2v}))), \\ \frac{d\rho_p^i}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} - \frac{2\alpha}{\dot{a}} \sqrt{\rho} \rho_p^i b (2c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + 2c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_p^v}{da} &= \frac{\langle \chi \rangle \delta}{2\Lambda_p^2 b} - \frac{2\alpha}{\dot{a}} \sqrt{\rho} \rho_p^v b (c_{2v} Q_{2v} + 2c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_d^v}{da} &= \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{2b}{\dot{a} r_a} \rho_d^v (c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{d\rho_d^i}{da} &= \frac{1}{\Lambda_p b} - \frac{2b}{\dot{a} r_a} \rho_d^i (c_{2v} Q_{2v} + c_i Q_i + c_{1v} Q_{1v}), \\ \frac{dc_i}{da} &= q \frac{\tau_{dyn}}{G} - \frac{c_i}{\dot{a}} [((1 - \omega_s) \rho_m + \rho_p + \rho_d) b^2 Q_i + Q_{1v} c_{1v} + Q_{2v} c_{2v} + Q_i (c_{1v} + c_{2v})], \\ \frac{dc_{1v}}{da} &= \frac{q \tau_{dyn}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} [(((1 - \omega_s) \rho_m + \rho_p + \rho_d) b^2 + c_i + c_{1v}) Q_{1v} c_{1v} + Q_i c_i c_{1v} - (Q_{2v} + Q_i) c_i c_{2v}], \\ \frac{dc_{2v}}{da} &= \frac{5q \tau_{dyn}}{6G} - \frac{1}{\dot{a}} [(((1 - \omega_s) \rho_m + \rho_p + \rho_d) b^2 + c_i) Q_{2v} c_{2v} + Q_i c_i c_{2v} - Q_{1v} c_{1v}^2]. \\ \dot{a} &= \frac{8}{\pi} \frac{\nu_D B \beta_r^{1/2}}{\xi^{1/6} F (1 - \beta_r)} \frac{\tau^3 (((1 - \beta_r) \rho_m + \rho_p + \rho_d) (\tau - \tau_a))^{1/3}}{G^{4/3} b^{1/3} (\tau^2 - G^2 b^2 \xi \beta_r \rho_m) \rho_m^{1/2}} \exp\left[-\frac{0,2Gb^3 - (\tau - \tau_a)\Lambda b^2}{kT}\right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь a – деформация сдвига; \dot{a} – скорость деформации, F – параметр, определяемый формой дислокационных петель и их распределением в зоне сдвига; ω_s – доля винтовых дислокаций; P_{as} – вероятность аннигиляции винтовых дислокаций; r_a – критический радиус захвата, τ_{dyn} – напряжение, избыточное над статическим сопротивлением движению дислока-

ций; Q_j – кинетический коэффициент; ν_D – частота Дебая; k – постоянная Больцмана; T – температура деформирования; $\langle \chi \rangle$ – средняя величина параметра, характеризующего геометрию дислокаций на частицах; q – параметр, определяющий интенсивность генерации точечных дефектов; ρ – суммарная плотность дислокаций, ξ – множитель Смоллмэна, ρ_p – плотность призматических дислокационных

петель, ρ_d – плотность дислокаций в дипольных конфигурациях; Λ – длина свободного дислокационного сегмента; β_r – доля реагирующих дислокаций леса. Атермическая составляющая сопротивления движению дислокаций τ_a в дисперсно-упрочнённом сплаве с некогерентными частицами обусловлена напряжением трения τ_f , взаимодействием с реагирующими дислокациями леса τ_d и напряжением обхода частиц τ_{Or} : $\tau_a = \tau_f + \tau_d + \tau_{Or}$.

Начальная плотность сдвигообразующих дислокаций задавалась соответствующей состоянию недеформированного кристалла, при этом предполагалось отсутствие дислокационных призматических петель и дислокаций в дипольных конфигурациях. Начальная концентрация точечных дефектов соответствовала концентрации термодинамически равновесных точечных дефектов при данной температуре. Расчёты проводились при трёх объёмных долях упрочняющей фазы ($f_1 = 10^{-4}$ %, $f_2 = 0,01$ %, $f_3 = 0,1$ %) при вариации размеров частиц δ ($\delta_1 = 10$ нм, $\delta_2 = 20$ нм). Скорость деформации задавалась равной 10^{-3} с $^{-1}$.

Решение системы уравнений численными методами позволило получить зависимости плотностей всех линейных и точечных дефектов от степени деформации, а также кривые течения $\tau(a)$ в температурном диапазоне от 193 до 493 К.

Результаты и их обсуждение

На рис.1 представлена температурная зависимость напряжения течения $\tau(T)$ дисперсно-упрочнённого материала с некогерентными частицами размером $\delta = 10$ нм при трёх значениях объёмной доли упрочняющей фазы. В материалах с большей объёмной долей упрочняющей фазы наблюдаются более высокие прочностные свойства (рис.1).

На рис.1 представлена температурная зависимость напряжения течения $\tau(T)$ дисперсно-упрочнённого материала с некогерентными частицами размером $\delta = 10$ нм при трёх значениях объёмной доли упрочняющей фазы. В материалах с большей объёмной долей упрочняющей фазы наблюдаются более высокие прочностные свойства (рис.1).

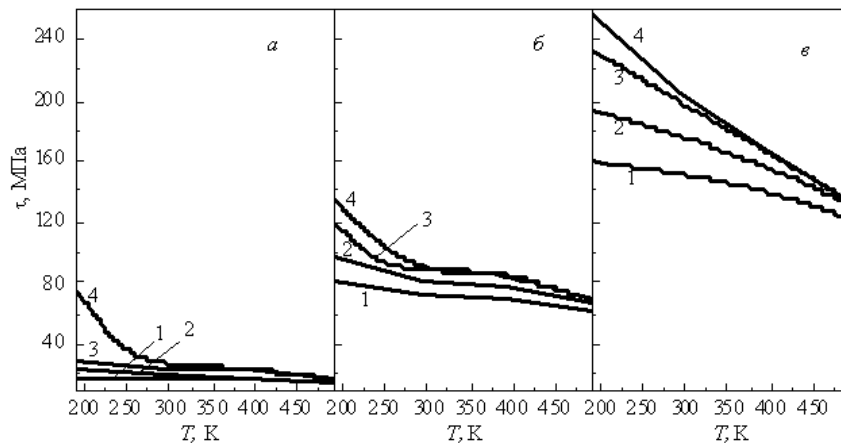


Рис.1. Температурная зависимость напряжения течения в дисперсно-упрочнённом материале на основе алюминия. Размер упрочняющих частиц 10 нм, расстояние между частицами: а) $\Lambda_p = 1000$ нм; б) $\Lambda_p = 200$ нм; в) $\Lambda_p = 100$ нм. Степень деформации: кр. 1 – 0.05; кр. 2 – 0.1; кр. 3 – 0.2; кр. 4 – 0.3

Fig.1. Temperature dependence of the flow stress in a dispersion-strengthened material based on aluminum.

The size of the strengthening particles is 10 nm, the distance between the particles is: а) $\Lambda_p = 1000$ nm; б) $\Lambda_p = 200$ nm; в) $\Lambda_p = 100$ nm. Degree of deformation: curve 1 – 0.05; curve 2 – 0.1; curve 3 – 0.2; curve 4 – 0.3

В материале с малой объёмной долей упрочняющих частиц при малых степенях деформации наблюдается слабая температурная зависимость напряжения течения (рис.1а, кривые 1-3). Это свидетельствует о слабо текущих аннигиляционных процессах, что связано с небольшим количеством деформационных точечных дефектов. Однако при увеличении степени деформации до $a = 0,3$ при температуре 193 К наблюдается резкое возрастание напряжения течения (рис.1а, кривая 4). Это обусловлено достижением в материале критической плотности

дислокаций [18], при которой в состав дислокационного ансамбля добавляются дипольные конфигурации, которые резко увеличивают плотность дислокаций и напряжение течения дисперсно-упрочнённого материала.

При увеличении объёмной доли упрочняющих частиц (рис.1б) поведение кривых температурной зависимости напряжения течения заметно изменяется. Кривые $\tau(T)$ при всех степенях деформации разделяются на 3 части: с сильной температурной зависимостью, затем слабой, и снова с сильной (рис.1б). При низких

температурах (меньше 300 К) наблюдается резкое падение механических свойств материала при увеличении температуры, что свидетельствует об усилении аннигиляционных процессов при появлении большего количества деформационных точечных дефектов (в алюминиевой матрице уже при комнатной температуре). Кроме того, при более высоких температурах не достигается критическая плотность дислокаций, и не образуются дипольные конфигурации, что способствует значительно более низкой плотности дислокаций и напряжению течения материала при данной температуре.

При высоких температурах (более 400 К) заметная температурная зависимость напряжения течения обусловлена усилением аннигиляционных процессов за счёт термодинамически равновесных точечных дефектов. Температурно-независимая область на кривых $\tau(T)$ обусловлена балансом между процессами генерации и аннигиляции дислокаций различного типа (рис.1б). При высокой температуре напряжение течения изменяется слабо в процессе деформации (рис.1а,б,в). Это характерно для материалов с разными масштабными характеристиками упрочняющей фазы (рис.1,2).

Увеличение объёмной доли упрочняющих некогерентных частиц в материале за счёт уменьшения расстояния между частицами при-

водит к возрастанию напряжения течения (рис.1в). При этом в составе дислокационной подсистемы отсутствуют дислокационные дипольные конфигурации. То есть существенное упрочнение (увеличение механических свойств) материала обеспечивают призматические петли и сдвигообразующие матричные дислокации. Температурная зависимость $\tau(T)$ при всех исследуемых значениях степеней деформации монотонно уменьшается при увеличении температуры (рис.1в).

Возрастание размеров наночастиц при одной и той же объёмной доле упрочняющей фазы прогнозирует уменьшение механических свойств (напряжения течения) материала (сравнить рис.1б и рис.2б). Исключение составляет кривая 4 (рис.2б): при низкой температуре деформации напряжение течения возрастает выше значения $\tau = 150$ МПа при степени деформации $a = 0.3$, что соответствует материалу с большей объёмной долей упрочняющей фазы (рис.2б,в). Это явление связано с появлением в составе дислокационной подсистемы помимо призматических петель и матричных дислокаций ещё и дипольных дислокационных конфигураций, что создаёт дополнительные препятствия движению матричных сдвигообразующих дислокаций и повышает напряжение течения.

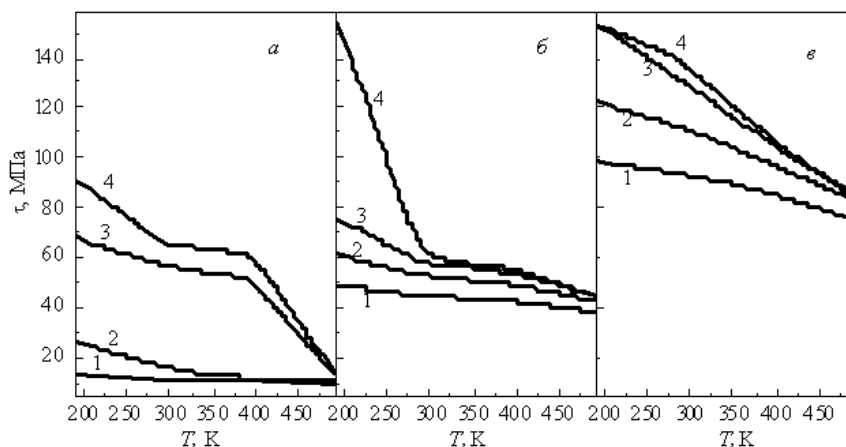


Рис.2. Температурная зависимость напряжения течения в дисперсно-упрочнённом материале на основе алюминия. Размер упрочняющих частиц 20 нм, расстояние между частицами: а) $\Lambda_p = 2000$ нм; б) $\Lambda_p = 400$ нм; в) $\Lambda_p = 200$ нм. Степень деформации: кр. 1 – 0.05; кр. 2 – 0.1; кр. 3 – 0.2; кр. 4 – 0.3

Fig.2. Temperature dependence of the flow stress in a dispersion-strengthened material based on aluminum.

The size of the strengthening particles is 20 nm, the distance between the particles: a) $\Lambda_p = 2000$ nm; б) $\Lambda_p = 400$ nm; в) $\Lambda_p = 200$ nm. Degree of deformation: curve 1 – 0.05; curve 2 – 0.1; curve 3 – 0.2; curve 4 – 0.3

Увеличение размера наночастиц в 2 раза в материалах с малой объёмной долей упрочняющей фазы (рис.1а, рис.2а) вносит заметное изменение в количественное поведение $\tau(T)$.

При степенях деформации $a = 0.2-0.3$ напряжение течения достигает значений, характерных для материала с большей объёмной долей упрочняющей фазы (рис.2а, кривые 3, 4). То есть

сплав с меньшей объёмной долей упрочняющих частиц может обеспечивать уровень механических свойств как сплав с более высокими значениями объёмной доли упрочняющей фазы (рис.2,б). Это явление вновь объясняется появлением в составе дислокационной подсистемы дополнительно дипольных структур.

Выводы

В работе посредством математического моделирования с учётом генерации, аннигиляции и релаксационного роста плотностей составляющих дислокационной подсистемы получена зависимость напряжения течения от температуры деформации дисперсно-упрочнённых кристаллических материалов с алюминиевой матрицей и некогерентными частицами упрочняющей фазы. Численные исследования проводились в рамках трёх фиксированных значений объёмной доли упрочняющей фазы и двух размерах частиц.

В материале с мелкими частицами (10 нм) в составе дислокационной структуры при трёх исследованных объёмных долях упрочняющих некогерентных частиц присутствуют призматические дислокационные петли и матричные сдвигобразующие дислокации, которые в основном обеспечивают прочностные свойства. При малой объёмной доле упрочняющей фазы в материале с частицами размером 20 нм в составе дислокационной структуры при больших деформациях ($a = 0,3$) могут дополнительно входить дипольные конфигурации, что увеличивает прочностные свойства материала.

Для материалов с небольшой объёмной долей упрочняющей фазы (10^{-4} , 0.01%) исследование выявило три стадии температурной зависимости напряжения течения: стадия при низкой температуре (193–293 К) с достаточно заметным уменьшением $\tau(T)$; температурно-независимая стадия при средних температурах (293–393 К) и стадия при высоких температурах (393–493 К), где вновь наблюдается уменьшение напряжения течения с ростом температуры.

Моделирование прогнозирует монотонное уменьшение $\tau(T)$ в сплавах с более высокой объёмной долей упрочняющей фазы (0.1%).

Увеличение размеров некогерентных частиц при фиксированной объёмной доле упрочняющей фазы сопровождается уменьшением напряжения течения при всех температурах деформации.

При малой объёмной доле упрочняющей фазы математическое моделирование выявляет

в сплаве с размером частиц 20 нм возрастание напряжения течения до величин, характерных для материалов с более высокими значениями объёмных долей упрочняющих частиц. Сплав с меньшим содержанием частиц при определённых условиях может проявлять более высокие прочностные свойства по сравнению со сплавом с более высоким содержанием упрочняющих некогерентных частиц.

Список литературы

1. Зоря И.В., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Взаимодействие примесных атомов С, N, O с вакансиями и вакансионными кластерами в Ni, Ag, Al // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. Т. 17, № 2. 2020. С. 148–154.
2. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. Mathematical modeling of plastic deformation of a tube from dispersion-hardened aluminum alloy in an inhomogeneous temperature field // *Crystals*. – 2020. – V. 10. – No. 12. – P. 1–18.
3. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T., Khrustalyov A., Zhukov I., Vorozhtsov A. Investigation of stresses induced due to the mismatch of the coefficients of thermal expansion of the matrix and the strengthening particle in aluminum-based composites // *Metals*. 2021. V. 11, N 2. P. 1–20.
4. Orowan E. Discussion on internal stresses. In: *Symposium on internal stresses in metals and alloys*. Institute of Metals: London, 1948. P. 451–453.
5. Эшби М.Ф. О напряжении Орована // *Физика прочности и пластичности*. 1972. С. 88–108.
6. Хирш П.Б., Хэмпфри Ф.Дж. Пластическая деформация двухфазных сплавов, содержащих малые недеформируемые частицы // *Физика прочности и пластичности*. 1972. С. 158–186.
7. Ковалевская Т.А., Колупаева С.Н., Данейко О.И., Семёнов М.Е., Кулаева Н.А. Математическое моделирование процессов деформационного упрочнения гетерофазных материалов с наноразмерными упрочняющими частицами // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 12. С. 5–9.
8. Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А. Напряженно-деформируемое состояние нагруженной трубы из сплава, упрочнённого некогерентными наночастицами // *Изв. вузов. Физика*. 2017. Т. 60, № 4. С.7–13.
9. Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А. Напряжённое состояние стенок трубы

из дисперсно-упрочненного алюминия под действием внешнего и внутреннего давления // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 10 (742). С. 50–57.

10. Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Матвиенко О.В. Влияние наноразмерных некогерентных частиц на прочностную термическую стабильность лёгких сплавов на основе алюминия // Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61, № 7 (727). С. 40–46.

11. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. Mathematical modeling of nanodispersed hardening of fcc materials // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2018. V. 31, N 12. P. 1297–1304.

12. Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Шалыгина Т.А., Симоненко В.Г. Влияние некогерентных наноразмерных частиц на аннигиляцию дислокаций в гетерофазных алюмоматричных кристаллических сплавах // Изв. вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 10(767). С. 98–103.

13. Зоря И.В., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Влияние примесных атомов углерода и кислорода на диффузию по границам наклона <110> в никеле и серебре // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 1. С. 45–51.

14. Липунов В.Н., Старостенков М.Д., Маркидонов А.В. и др. Моделирование зарождения дислокационных петель на поверхности цилиндрических пор в ГЦК кристалле при внешнем воздействии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 4. С. 437–442.

15. Алферова Е.А., Лычагин Д.В. Взаимосвязь структурных элементов деформационного рельефа и дислокационной субструктуры в [1-1] монокристаллах никеля // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, № 2. С. 222–228.

16. Малашенко В.В., Малашенко Т.И. Влияние точечных дефектов на величину деформирующего напряжения нанокристаллических материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11, № 4. С. 433–436.

17. Данейко О.И., Ковалевская Т.А. Влияние температуры на механические свойства дисперсно-упрочнённых кристаллических материалов с некогерентными наноразмерными частицами // Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61, № 9 (729). С. 120–127.

18. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. 168 с.

19. Ковалевская Т.А., Данейко О.И. Влияние масштабных характеристик упрочняющей фазы на формирование зоны пластического сдвига в гетерофазных сплавах с дисперсными некогерентными частицами // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 12 (744). С. 81–87.

20. Ковалевская Т.А., Данейко О.И., Шалыгина Т.А. Влияние размеров упрочняющих некогерентных частиц на формирование дефектной структуры и прочностных свойств дисперсно-упрочнённых сплавов на алюминиевой основе // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63, № 4 (748). С. 139–143.

Информация об авторах

Т. А. Ковалевская – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

О. И. Данейко – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики, химии и теоретической механики Томского государственного архитектурно-строительного университета.

References

1. Zorya, I. V., Poletaev, G. M. & Starostenkov, M. D. (2020). Interaction of impurity atoms C, N, O with vacancies and vacancy clusters in Ni, Ag, Al. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(17), 148–154. (In Russ.).

2. Matvienko, O., Daneyko, O. & Kovalevskaya, T. (2020). Mathematical modeling of plastic deformation of a tube from dispersion-hardened aluminum alloy in an inhomogeneous temperature field. *Crystals*, 10(12), 1–18.

3. Matvienko, O., Daneyko, O., Kovalevskaya, T., Khrustalyov, A., Zhukov, I. & Vorozhtsov, A. (2021). Investigation of stresses induced due to the mismatch of the coefficients of thermal expansion of the matrix and the strengthening particle in aluminum-based composites. *Metals*, 11(2), 1–20.

4. Orowan, E. (1948). Discussion on internal stresses. In: Symposium on internal stresses in metals and alloys. Institute of Metals: London, P. 451–453.

5. Ashby, M. F. (1972). On the Orowan stress. *Physics of strength and plasticity*, 88–108. (In Russ.).

6. Hirsch, P. B. & Humphrey, F. J. (1972). Plastic deformation of two-phase alloys containing

small non-deformable particles. *Physics of strength and plasticity*, 158–186. (In Russ.)

7. Kovalevskaya, T. A., Kolupaeva, S. N., Daneyko, O. I., Semenov, M. E. & Kulaeva, N. A. (2010). Mathematical modeling of the processes of strain hardening of heterophase materials with nanosized hardening particles. *Deformation and destruction of materials*, 12, 5–9. (In Russ.).

8. Matvienko, O. V., Daneyko, O. I. & Kovalevskaya, T. A. (2017). Stress-strain state of pipe made of copper-based alloy strengthened with incoherent nanoparticles. *Russian Physics Journal*, (60), 562–569.

9. Matvienko, O. V., Daneyko, O. I. & Kovalevskaya, T. A. (2019). Elastoplastic deformation of dispersion-hardened aluminum tube under external and internal pressure. *Russian Physics Journal*, 62, 720–728.

10. Daneyko, O. I., Kovalevskaya, T. A. & Matvienko, O. V. (2018). The influence of incoherent nanoparticles on thermal stability of aluminum alloys. *Russian Physics Journal*, 61(7), 1229–1235.

11. Matvienko, O., Daneyko, O. & Kovalevskaya, T. (2018). Mathematical modeling of nanodispersed hardening of fcc materials. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 31(12), 1297–1304.

12. Daneyko, O. I., Kovalevskaya, T. A., Shalygina, T. A. & Simonenko, V. G. (2022). Influence of Nanosized Incoherent Particles on Dislocation Annihilation in Heterophase Aluminum-Matrix Crystalline Alloys. *Russian Physics Journal*, 64, 1893–1898.

13. Zorya, I. V., Poletaev, G. M. & Starostenkov, M. D. (2020). Influence of impurity carbon and oxygen atoms on diffusion along $\langle 110 \rangle$ slope boundaries in nickel and silver. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 45–51. (In Russ.).

14. Lipunov, V. N., Starostenkov, M. D. & Markidonov, A. V. (2020). Simulation of the origin of dislocation loops on the surface of cylindrical pores in an fcc crystal under external action. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(4), 437–442. (In Russ.).

15. Alferova, E. A. & Lychagin, D. V. (2018). Relationship between structural elements of deformation relief and dislocation substructure in [1-1-1] nickel single crystals. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 15(2), 222–228. (In Russ.).

16. Malashenko, V. V. & Malashenko, T. I. (2014). Influence of point defects on the magnitude of the deforming stress of nanocrystalline materials. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 11(4), 433–436. (In Russ.).

17. Daneyko, O. I. & Kovalevskaya, T. A. (2019). Temperature effect on stress-strain properties of dispersion-hardened crystalline materials with incoherent nanoparticles. *Russian Physics Journal*, 61(9), 1687–1694.

18. Kovalevskaya, T. A., Vinogradova, I. V. & Popov, L. E. (1992). Mathematical Modeling of Plastic Deformation in Heterophase Alloys, TSU, Tomsk, Russia. P. 234. (In Russ.).

19. Kovalevskaya, T. A. & Daneyko, O. I. (2020). The influence of scale parameters of strengthening phase on plastic shear zone in heterophase alloys with incoherent nanoparticles. *Russian Physics Journal*, 62(12), 2247–2254.

20. Kovalevskaya, T. A., Daneyko, O. I. & Shalygina, T. A. (2020). The Influence of Incoherent Particle Size on Defect Structure and Strength Properties of Disperse-hardened Aluminum Alloys. *Russian Physics Journal*, 63(4), 688–692.

Information about the authors

T. A. Kovalevskaya – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of Department of Physic, chemistry and theoretical mechanic, Tomsk State University of Architecture and Building.

O. I. Daneyko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, Assistant professor of Department of Physic, chemistry and theoretical mechanic, Tomsk State University of Architecture and Building.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.01.2022; одобрена после рецензирования 24.01.2022; принята к публикации 07.02.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Jan. 22; approved after reviewing 24 Jan. 22; accepted for publication 07 Feb. 22.