

УДК 539.37:691.32

DOI 10.17223/19988621/72/9

О.В. Матвиенко, О.И. Данейко, Т.А. Ковалевская

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТенок ТРУБЫ ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ¹

С использованием подхода, основанного на сочетании методов физической теории пластичности и механики деформируемого твердого тела, проведено исследование формирования остаточных напряжений после упругопластической деформации стенок трубы в результате воздействия внешнего давления. В результате исследований установлено, что при одном и том же значении приложенного давления для сплавов, упрочненных более крупными частицами, толщина области, подвергнувшейся пластической деформации, оказывается меньше, чем для сплава, упрочненного мелкими частицами. Величина остаточных окружных и осевых напряжений более чем на порядок превосходит величину остаточных радиальных напряжений. Поэтому в первом приближении остаточные радиальные напряжения можно не учитывать.

Ключевые слова: *дисперсно-упрочнённые материалы, наноразмерные частицы, пластическая деформация, математическая модель, деформационное упрочнение, разгрузка, остаточные напряжения.*

Повышение прочностных и эксплуатационных свойств конструкционных материалов является важнейшей задачей в машиностроении. Известно, что использование композиционных материалов, состоящих из высокопрочных наполнителей (дисперсных фаз) и пластичных связующих (матриц), позволяет обеспечить требуемый уровень надежности и долговечности технологических устройств, применяемых в энергетике, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, автомобилестроении, авиации и космонавтике [1]. В связи с этим применение дисперсно-упрочнённых сплавов открывает новые возможности для создания высокоэффективного оборудования в различных отраслях промышленности.

Дисперсно-упрочненные материалы, в матрице которых распределены наноразмерные частицы [2, 3], проявляют уникальные свойства по сравнению с традиционными сплавами [4–6]. Эти материалы характеризуются изотропией механических свойств, высокой пластичностью и прочностью [7]. Ансамбль дисперсных частиц наполнителя упрочняет материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении, что затрудняет пластическую деформацию. Упрочняющие частицы, распределенные в матрице, в соответствии с теорией Орована [8] препятствуют движению дислокаций и тем самым способствуют повышению прочностных и деформационных свойств. Прочностные характеристики дисперсно-упрочненных материалов определяются формой, размером частиц, а также расстоянием между ними [9]. Варьирование состава матрицы, размера частиц и их объемной доли [10] позволяет получить материалы, обладающие различными свойствами.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).

Существуют и внедрены в производство различные методы управления структурой сплава [11]. Применение упрочняющих неметаллических частиц является актуальной проблемой для улучшения структуры литого сплава за счет измельчения структурных составляющих (твердый раствор α -Al, эвтектические фазы α -Al + Si). В настоящее время имеется ряд экспериментальных данных по использованию оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2), карбидов и боридов для модификации зеренной структуры сплава Al-Si [12]. Углеродные наноматериалы (углеродные нанотрубки, фуллерен и шунгитовый углерод) также широко используются для улучшения зеренной структуры и улучшения механических свойств алюминиевых сплавов [13, 14]. В работе [13] исследованы микроструктура и механические характеристики алюминиевого сплава A356, упрочненного наночастицами трифторида скандия с отрицательным коэффициентом теплового расширения. Обнаружена высокая эффективность использования модификаторов на основе фторида скандия и дополнительной обработки ультразвуком. В работе [14] проведено комплексное изучение изменения физико-механических свойств от технологии изготовления и обработки каждой партии полученных сплавов. Установлено, что сплавы, содержащие частицы TiB_2 , имеют сформировавшуюся зернистую структуру. Введение частиц TiB_2 позволяет повысить предел текучести, предел прочности и пластичность сплава. Наибольший эффект измельчения структуры литых сплавов достигается при использовании лигатуры, содержащей микрочастицы TiB_2 размером 1 мкм.

Теоретическое изучение физических основ пластичности и деформационного упрочнения гетерофазных сплавов берёт своё начало с работ Орована [8], Эшби [15], Хирша [16], Хамфриса [17]. В исследовании [18] рассматриваются аспекты деформационного поведения дисперсно-упрочненных алюминиевых материалов при одноосной ползучести в широком температурном диапазоне. Полученные в рамках этой работы результаты показывают возможность значительного улучшения свойств микрокомпозитов.

Авторами [19, 20] проведено исследование влияния масштабных характеристик некогерентных упрочняющих частиц на деформационное упрочнение ГЦК-кристаллических материалов и формирование их дислокационной структуры: призматических петель, диполей, матричных сдвигообразующих дислокаций. В рамках математической модели пластической деформации монокристаллов дисперсно-упрочненных ГЦК-материалов с наноразмерными частицами в работе проведено исследование влияния температуры и скорости деформации на поведение материала и эволюцию его дислокационной подсистемы. Установлено, что в материалах с наноразмерной упрочняющей фазой независимо от её сопряжения с матрицей наблюдается более интенсивное деформационное упрочнение, чем в материалах с более крупными частицами при одинаковой объёмной доле упрочняющей фазы.

В процессе эксплуатации в результате различных физических процессов, связанных с изготовлением и обработкой изделий, в элементах конструкций могут возникать остаточные напряжения, которые влияют на прочностные характеристики конструкций при повторных нагружениях [21]. Поэтому проблемам исследования остаточных напряжений уделяется значительное внимание [22–24].

Настоящая работа продолжает исследования воздействия поля давления на деформацию стенок трубы из сплава на основе алюминия, упрочненного некогерентными наночастицами [25–34]. Цель настоящей работы – изучение остаточных напряжений в трубе, изготовленной из дисперсно-упрочненного сплава на основе

алюминия, в состоянии разгрузки после упругопластического деформирования. Исследования проведены на основе подхода, сочетающего методы физической теории пластичности и механики деформируемого твердого тела. В рамках этого подхода напряжения в стенках трубы находятся в результате решения уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием условия упрочнения материала, выражающего связь между предельным напряжением сдвига и степенью деформации, которое получено на основе физической теории пластичности.

Механические свойства материала

Для описания пластических свойств материала использована математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочненных сплавов с некогерентными частицами [19]. Модель включает уравнения баланса деформационных линейных и точечных дефектов с учетом их генерации, аннигиляции и трансформации в процессе пластической деформации. Физические механизмы, лежащие в основе математической модели, представлены в работе [35]. При моделировании процесса пластической деформации и деформационного упрочнения предполагается, что в процессе пластического сдвига дисперсно-упрочненных материалов с ГЦК-матрицей, содержащих некогерентную дисперсную фазу, формируется зона сдвига и образуются следующие типы деформационных дефектов: линейные – сдвигообразующие дислокации, призматические петли вакансионного и междузельного типа; дислокационные диполи вакансионного и междузельного типа, точечные деформационные дефекты – междузельные атомы, моновакансии, бивакансии.

Аппроксимация результатов численного решения уравнений баланса элементов деформационной дефектной среды позволяет с погрешностью, не превышающей 0.1 %, предложить следующую функциональную зависимость предельного напряжения сдвига τ_s от степени деформации a :

$$\tau_s = \max \left[\tau_0, \tau_0 + \tau_1 \frac{Ga - \tau_0}{G(a + a_*) - \tau_0} \right], \quad (1)$$

где G – модуль сдвига; τ_0 , τ_1 , a_* – параметры, характеризующие свойства материала, значения которых для различных размеров упрочняющих частиц δ , расстояний Λ_p между ними при разных температурах деформации представлены в таблице.

Параметры	$T = 293$ К	$T = 393$ К	$T = 493$ К
$\Lambda_p = 100$ нм $\delta = 10$ нм	$\tau_0 = 81.08$ МПа	$\tau_0 = 77.06$ МПа	$\tau_0 = 68.83$ МПа
	$\tau_1 = 139.94$ МПа	$\tau_1 = 99.29$ МПа	$\tau_1 = 69.87$ МПа
	$a_* = 0.0437$	$a_* = 0.0244$	$a_* = 0.0151$
$\Lambda_p = 200$ нм $\delta = 20$ нм	$\tau_0 = 43.13$ МПа	$\tau_0 = 40.73$ МПа	$\tau_0 = 36.26$ МПа
	$\tau_1 = 110.13$ МПа	$\tau_1 = 71.86$ МПа	$\tau_1 = 52.02$ МПа
	$a_* = 0.0548$	$a_* = 0.0264$	$a_* = 0.0167$

Пластическая деформация начинается, когда интенсивность напряжений в материале становится равной предельному напряжению сдвига τ_0 . Кривые упрочнения характеризуются монотонной зависимостью предельного напряжения сдвига от степени деформации. Рассмотрение кривой упрочнения показывает, что в процессе пластического деформирования материал упрочняется, поскольку повыша-

ется предел пластичности. При малых значениях степени пластической деформации a_{pl} наблюдается заметное увеличение τ . При больших a_{pl} кривая упрочнения выходит на горизонтальную асимптоту, соответствующую площадке текучести при $\tau = \tau_{\infty} = \tau_0 + \tau_1$. Быстроту выхода кривой течения на асимптоту определяет эмпирический параметр a_* .

Результаты моделирования показывают, что упрочнение материала наночастицами существенно изменяет прочностные характеристики материала. Уменьшение расстояния между частицами для одной и той же объемной доли упрочняющей фазы приводит к более интенсивному торможению дислокаций, что вызывает упрочнение материала, приводящее к росту напряжения течения τ . С ростом температуры материал становится более пластичным, что сопровождается понижением напряжения течения материала.

Напряжения и деформации в стенке трубы, нагруженной равномерным внешним давлением

Рассмотрим сначала напряженно-деформированное состояние трубы, нагруженной равномерным внешним давлением. Внутреннее давление предполагается отсутствующим. Радиусы внутренней и внешней стенок трубы равны соответственно R_{in} и R_{ex} .

При малой величине приложенного давления p деформация стенок трубы является упругой. Если величина приложенного давления становится равной пределу упругого сопротивления ($p = p_{el}$), то на внутренней стенке трубы возникает пластическая деформация. При ещё большем давлении пластическое состояние охватывает кольцевой слой радиусом R_{pl} , примыкающий к внутренней поверхности трубы. К внешней границе этого слоя будет примыкать область, в которой ещё сохраняется упругое состояние материала. Когда величина приложенного давления достигает предела пластического сопротивления ($p = p_{pl}$), весь материал по толщине трубы перейдет в пластическое состояние. С увеличением приложенного давления напряжения в стенке трубы возрастают.

Известно [36], что поперечные сечения длинной трубы, удаленные от торцов, в случае приложения нагрузки в радиальном направлении будут оставаться плоскими. С учетом осевой симметрии задачи уравнение равновесия, описывающее баланс напряжений в радиальном направлении можно записать как

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) содержит две неизвестные величины: компоненты тензора напряжений σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$. Дополнительное соотношение в случае упругой деформации можно получить с помощью уравнения совместности напряжений, которое имеет вид [37]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} (\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}) \right) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения равновесия (2) вместе с уравнением совместности напряжений (3) при выполнении граничных условий

$$r = R_{pl} : \sigma_{rr} = q ; \quad r = R_{ex} : \sigma_{rr} = -p \quad (4)$$

позволяет определить напряжения в стенках трубы в упругой области ($R_{pl} \leq r \leq R_{ex}$)

с помощью следующих зависимостей:

$$\sigma_{rr} = -\frac{qR_{pl}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 - \frac{R_{ex}^2}{r^2}\right) - \frac{pR_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 - \frac{R_{pl}^2}{r^2}\right); \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = -\frac{qR_{pl}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 + \frac{R_{ex}^2}{r^2}\right) - \frac{pR_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 + \frac{R_{pl}^2}{r^2}\right); \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = -2\nu \frac{qR_{pl}^2 + pR_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2}. \quad (7)$$

В уравнениях (5) – (7) q – радиальное напряжение на границе упругой и пластической областей.

При пластической деформации упрочняющейся среды дополнительным условием, связывающим компоненты тензора напряжений, является условие пластического упрочнения [36]:

$$|\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}| = \tau_s(a). \quad (8)$$

Известно [37], что изменение объема происходит только за счет упругих деформаций, а при пластическом деформировании материал ведет себя как несжимаемый. Условие несжимаемости материала запишем в виде

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0, \quad (9)$$

где u_r – перемещение стенки трубы в радиальном направлении. Интегрируя (9), получаем

$$u_r = \frac{C}{r}, \quad (10)$$

где C – константа интегрирования, которая подлежит определению. Выражение (10) позволяет установить зависимость компонент тензора деформации и интенсивности сдвиговых деформаций от радиальной координаты:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{C}{r^2}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r} = \frac{C}{r^2}, \quad a = \sqrt{2(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2)} = 2\frac{|C|}{r^2}. \quad (11)$$

С учетом физических соотношений (1), (2) уравнение равновесия в пластической области ($R_{in} \leq r \leq R_{pl}$) запишем в виде

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} = -\left(\frac{\tau_0}{r} + \tau_1 \frac{2G|C| - \tau_0 r^2}{a_2 G r^3 + 2G|C|r}\right), \quad (12)$$

где $a_2 = a_* - \frac{\tau_0}{G}$.

В результате интегрирования (12) с учетом граничного условия на внутренней стенке трубы (при $r = R_{in}$, $\sigma_{rr} = 0$), а также непрерывности напряжений на границе зон упругого и пластического деформирования материала получим

$$|C| = \frac{1}{2} \tau_0 G^{-1} R_{pl}^2; \quad (13)$$

$$q = -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{R_{pl}}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{(\tau_0 + a_2 G) R_{pl}^2}\right); \quad (14)$$

$$\sigma_{rr} = -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 Gr^2}\right); \quad (15)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr} - \tau_0 \left(1 + \frac{\tau_1 (R_{pl}^2 - r^2)}{a_2 Gr^2 + \tau_0 R_{pl}^2}\right); \quad (16)$$

$$\sigma_{zz} = -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 Gr^2}\right) - \frac{\tau_0}{2} \left(1 + \frac{\tau_1 (R_{pl}^2 - r^2)}{a_2 Gr^2 + \tau_0 R_{pl}^2}\right). \quad (17)$$

Границу зоны упругого и пластического деформирования материала для заданного давления p можно определить из решения трансцендентного уравнения:

$$p = (\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{R_{pl}}{R_{in}}\right) + \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{pl}^2}\right) + \tau_0 \left(1 + \frac{R_{ex}^2 - R_{pl}^2}{2R_{ex}^2}\right). \quad (18)$$

Математическая модель процесса разгрузки

Рассмотрим теперь напряженно-деформированное состояние трубы после снятия внешнего давления p . Разгрузка после упругой деформации приводит к восстановлению первоначального состояния. Однако если в процессе деформации материал стенок трубы перешел в пластическое состояние, то материал в зоне пластической деформации будет характеризоваться остаточными напряжениями и деформациями.

В бывшей пластической области ($r \leq R_{pl}$) после снятия нагрузки будут действовать напряжения:

$$\sigma_{rr} = -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{R_{pl}^2 \tau_0 + a_2 GR_{in}^2}{R_{pl}^2 \tau_0 + a_2 Gr^2}\right) + \frac{R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} p \left(1 - \frac{R_{in}^2}{r^2}\right); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi} = & -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 Gr^2}\right) - \\ & \tau_0 \left(1 + \frac{\tau_1 (R_{pl}^2 - r^2)}{a_2 Gr^2 + \tau_0 R_{pl}^2}\right) + \frac{R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} p \left(1 + \frac{R_{in}^2}{r^2}\right); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} = & -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{r}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2}\right) \ln\left(\frac{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 GR_{in}^2}{\tau_0 R_{pl}^2 + a_2 Gr^2}\right) - \\ & - \frac{\tau_0}{2} \left(1 + \frac{\tau_1 (R_{pl}^2 - r^2)}{a_2 Gr^2 + \tau_0 R_{pl}^2}\right) + 2\nu \frac{R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} p. \end{aligned} \quad (21)$$

В бывшей упругой области ($R_{pl} \leq r \leq R_{ex}$) напряжения будут равны

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{rr}^* R_{pl}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 - \frac{R_{ex}^2}{r^2} \right), \quad \sigma_{\varphi\varphi} = -\frac{\sigma_{rr}^* R_{pl}^2}{R_{ex}^2 - R_{pl}^2} \left(1 + \frac{R_{ex}^2}{r^2} \right), \quad \sigma_{zz} = 2\nu\sigma_{rr}^* \frac{R_{pl}^2}{2R_{ex}^2}, \quad (22)$$

где σ_{rr}^* – нормальное напряжение на границе бывших упругой и пластической областей:

$$\sigma_{rr}^* = -(\tau_0 + 2\tau_1) \ln\left(\frac{R_{pl}}{R_{in}}\right) - \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2} \right) \ln\left(\frac{R_{pl}^2 \tau_0 + a_2 GR_{in}^2}{R_{pl}^2 \tau_0 + a_2 GR_{pl}^2}\right) + \frac{R_{ex}^2}{R_{ex}^2 - R_{in}^2} p \left(1 - \frac{R_{in}^2}{R_{pl}^2} \right). \quad (23)$$

Анализ результатов

Рассмотрим основные результаты исследования пластической деформации трубы из алюминия, упрочненного некогерентными наночастицами. При математическом моделировании предполагалось, что внутренний радиус равен $R_{in} = 0.1$ м, а внешний – $R_{ex} = 0.105$ м.

Рассмотрим сначала напряжения, возникающие в результате нагружения стенки трубы внешним давлением.

На рис. 1 приведены зависимости радиального σ_{rr} , тангенциального $\sigma_{\varphi\varphi}$ и осевого напряжения σ_{zz} от радиальной координаты, рассчитанные при разных давлениях, соответствующих различному положению границы между зоной пластической и упругой деформации. Кривая 1 соответствует пределу упругого сопротивления, кривая 5 – пределу пластического сопротивления. Радиальные напряжения в стенке трубы σ_{rr} принимают отрицательные значения, что свидетельствует о сжатии стенки трубы в радиальном направлении. Абсолютные значения напряжения σ_{rr} по мере удаления от внутренней стенки трубы монотонно увеличиваются от $|\sigma_{rr}| = 0$ до $|\sigma_{rr}| = p$. Различие значений предела упругого и пластического сопротивления $\Delta p = p^* - p_1$ мало. Этим объясняется близость кривых 1 – 5 (рис. 1, а).

Зависимость $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ в предельных случаях является монотонной: при $p = p_1$ – монотонно возрастающей, при $p = p^*$ – монотонно убывающей (рис. 1, б). Это означает, что при достижении предела упругого сопротивления максимальное абсолютное значение тангенциального напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ достигается вблизи внутренней стенки трубы, а при достижении предела пластического сопротивления – вблизи внешней стенки. В промежуточных случаях распределение $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ является немонотонным. Абсолютная величина напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ возрастает в пластической области, достигая максимума при $r = R_{pl}$. В упругой области величина напряжения по мере приближения к внешней стенке монотонно убывает. С увеличением приложенного давления наблюдается увеличение абсолютных значений напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ вблизи границы зоны пластической деформации. Отметим, что напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$, связанные с деформацией стенки трубы в тангенциальном направлении, более чем на порядок превосходят по абсолютной величине напряжения в радиальном направлении σ_{rr} .

Осевые напряжения σ_{zz} во всем сечении трубы принимают отрицательные значения, что означает сжатие стенок трубы в осевом направлении. В бывшей пластической области осевые напряжения возрастают по абсолютной величине по мере удаления от внутренней стенки трубы и приближения к R_{pl} . На границе бывшей пластической зоны осевые напряжения терпят разрыв. Абсолютная величина

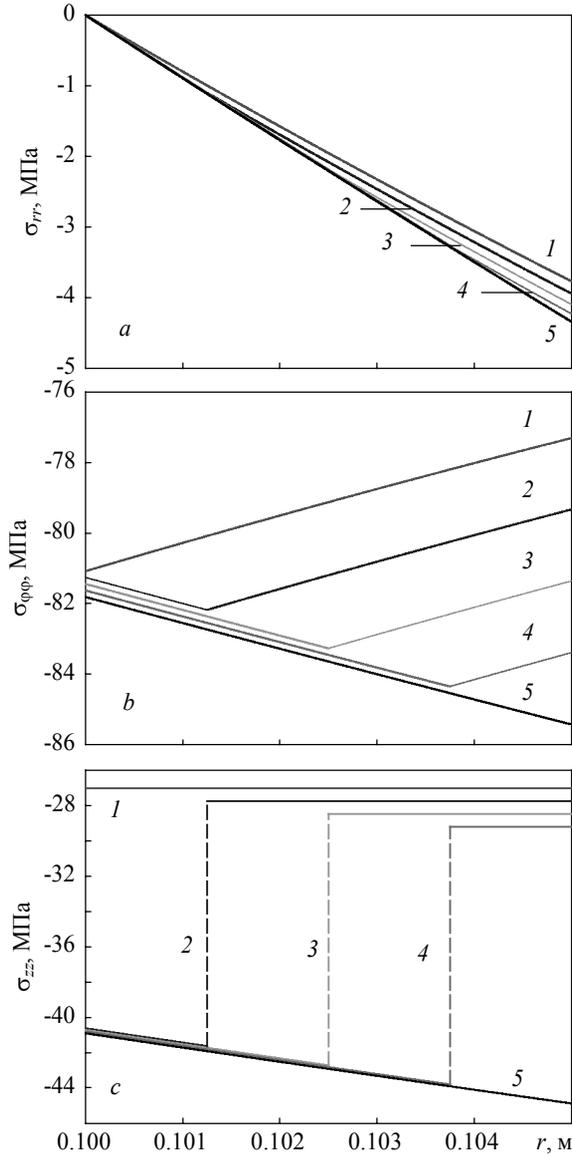


Рис. 1. Зависимость (а) радиального σ_{rr} , (b) тангенциального $\sigma_{\phi\phi}$ и (с) осевого напряжения σ_{zz} от радиальной координаты p : 1 – 3.77 МПа ($R_{pl} = 0.1$ м), 2 – 3.94 МПа ($R_{pl} = 0.10125$ м), 3 – 4.09 МПа ($R_{pl} = 0.1025$ м), 4 – 4.34 МПа ($R_{pl} = 0.10375$ м), 5 – 2.26 МПа ($R_{pl} = 0.105$ м). Масштабные характеристики упрочняющей фазы: $\Lambda_p = 100$ нм, $\delta = 10$ нм; температура деформации $T = 293$ К

Fig. 1. Dependence of the (a) radial σ_{rr} , (b) tangential $\sigma_{\phi\phi}$, and (c) axial stresses σ_{zz} on the radial coordinate p : 1 – 3.77 MPa ($R_{pl} = 0.1$ m), 2 – 3.94 MPa ($R_{pl} = 0.10125$ m), 3 – 4.09 MPa ($R_{pl} = 0.1025$ m), 4 – 4.34 MPa ($R_{pl} = 0.10375$ m), and 5 – 2.26 MPa ($R_{pl} = 0.105$ m). Scale characteristics of a hardening phase: $\Lambda_p = 100$ nm, $\delta = 10$ nm; deformation temperature is $T = 293$ K

осевых напряжений резко уменьшается. При $R_{pl} < 1$ величина осевых напряжений не зависит от радиальной координаты. С увеличением величины приложенного давления p происходит рост абсолютных значений σ_{zz} .

Перейдем теперь к рассмотрению напряженного состояния после прекращения действия внутреннего давления p (рис. 2). Зависимость остаточного радиального напряжения от радиальной координаты в сплавах, упрочненных частицами различного размера, при разных значениях p показана на рис. 2, а. Если в процессе нагружения величина приложенного давления не превышает

$$p_* = \frac{R_{ex}^2 - R_{in}^2}{2R_{ex}^2} \left(\tau_0 + \tau_1 \left(2 - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{Ga_2} \right) \frac{2Ga_2R_{in}^2}{\tau_0R_{pl}^2 + Ga_2R_{in}^2} \right) \right), \quad (24)$$

то в бывшей пластической области происходит сжатие материала в радиальном направлении. Абсолютная величина остаточного радиального напряжения монотонно возрастает по мере удаления от внутренней стенки, а в бывшей пластической – убывает. Максимальное значение остаточного радиального напряжения локализуется при $r = R_{pl}$. Если в результате нагружения величина приложенного давления $p > p_*$, то разгрузка вблизи внутренней стенки трубы приводит к растяжению: остаточные напряжения принимают положительные значения (рис. 2, кривая 4). Область растяжения увеличивается с ростом давления и при $p = p_{pl}$ достигает внешней стенки трубы. При одном и том же значении приложенного давления для сплавов, упрочненных более крупными частицами, толщина области, подвергнувшейся пластической деформации, оказывается меньше, чем для сплава, упрочненного мелкими частицами.

Вблизи внутренней стенки трубы остаточные радиальные напряжения возрастают с ростом размеров упрочняющих частиц. Вблизи внешней стенки наблюдается противоположная зависимость.

Величина остаточных окружных (рис. 2, б) и осевых (рис. 2, в) напряжений более чем на порядок превосходит величину остаточных радиальных напряжений. Поэтому в первом приближении остаточные радиальные напряжения σ_r можно не учитывать. Окружные остаточные напряжения $\sigma_{\phi\phi}$ при разгрузке становятся растягивающими (рис. 2, б). Наибольшие значения окружных остаточных напряжений $\sigma_{\phi\phi}$ наблюдаются на внутренней стенке. При $r < R_{pl}$ окружные напряжения линейно уменьшаются с увеличением радиальной координаты r . При $r > R_{pl}$ изменение $\sigma_{\phi\phi}$ становится несущественным. Величина остаточного напряжения $\sigma_{\phi\phi}$ определяется как условиями нагружения трубы, так и размером упрочняющих частиц. С ростом давления происходит увеличение абсолютных значений остаточного напряжения $\sigma_{\phi\phi}$ по всей толщине стенки трубы. В результате упрочнения сплава более крупными частицами возрастает сопротивляемость материала пластическим деформациям. После снятия нагрузки абсолютная величина остаточных окружных напряжений тем больше, чем меньше размер упрочняющих частиц.

Радиальное распределение остаточного напряжения σ_{zz} (рис. 2, в) качественно повторяет распределение остаточного напряжения $\sigma_{\phi\phi}$: при $r < R_{pl}$ осевые напряжения линейно убывают по мере удаления от внутренней стенки трубы. При $r = R_{pl}$ происходит резкое уменьшение остаточных осевых напряжений, при $r > R_{pl}$ остаточные напряжения σ_{zz} перестают зависеть от радиальной координаты. Отметим, что во всем сечении трубы остаточные осевые напряжения являются растягивающими. С ростом давления нагружения p происходит рост абсолютных значений σ_{zz} . Увеличение размеров упрочняющих частиц приводит к уменьшению абсолютных значений остаточных осевых напряжений.

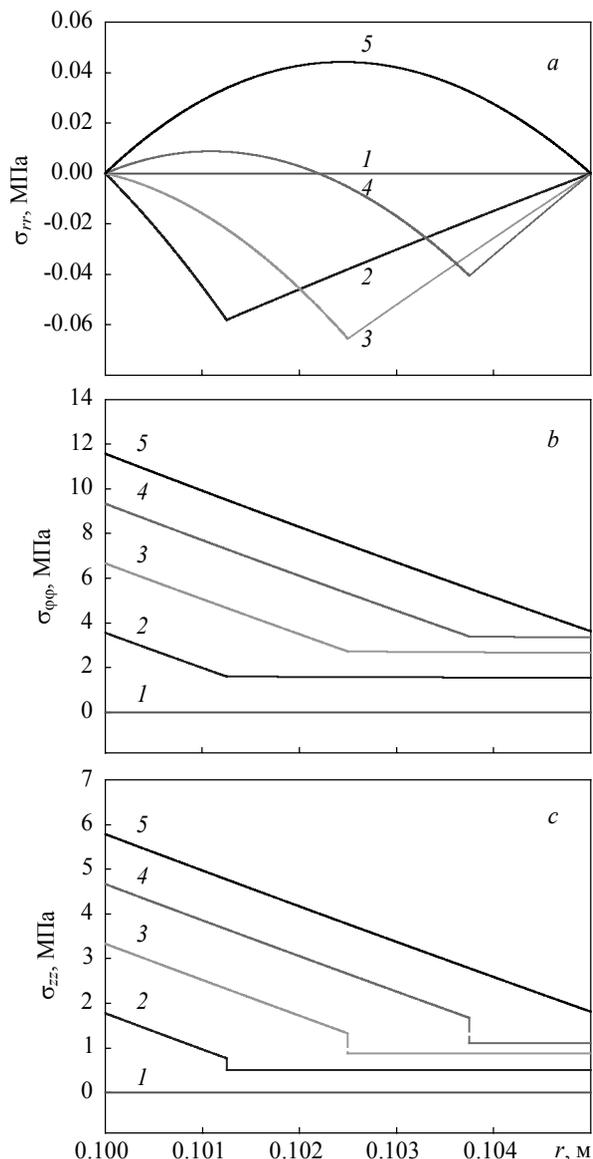


Рис. 2. Зависимость остаточных (а) радиального σ_{rr} , (б) тангенциального $\sigma_{\phi\phi}$ и (с) осевого напряжения σ_{zz} от радиальной координаты p : 1 – 3.77 МПа ($R_{pl} = 0.1$ м), 2 – 3.94 МПа ($R_{pl} = 0.10125$ м), 3 – 4.09 МПа ($R_{pl} = 0.1025$ м), 4 – 4.34 МПа ($R_{pl} = 0.10375$ м), 5 – 2.26 МПа ($R_{pl} = 0.105$ м). Масштабные характеристики упрочняющей фазы: $\Lambda_p = 100$ нм, $\delta = 10$ нм; температура деформации $T = 293$ К

Fig. 2. Dependence of the (a) radial, (b) tangential, and (c) axial residual stresses on the radial coordinate p : 1 – 3.77 MPa ($R_{pl} = 0.1$ m), 2 – 3.94 MPa ($R_{pl} = 0.10125$ m), 3 – 4.09 MPa ($R_{pl} = 0.1025$ m), 4 – 4.34 MPa ($R_{pl} = 0.10375$ m), 5 – 2.26 MPa ($R_{pl} = 0.105$ m). Scale characteristics of a hardening phase: $\Lambda_p = 100$ nm, $\delta = 10$ nm; deformation temperature is $T = 293$ K

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований создана физико-математическая модель разгрузки из упругопластического состояния трубы, изготовленной из дисперсно-упрочнённого сплава на основе алюминия, а также определены поля остаточных напряжений после разгрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мэтьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
2. Карабасов Ю.С. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИССИС, 2002. 736 с.
3. Arnhold V., Hummert K. New Materials by Mechanical Alloying Techniques / ed. By E. Arzt, L. Schultz. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1989. P. 263.
4. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. Mathematical modeling of nanodispersed hardening of FCC materials // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2018. V. 31. No. 12. P. 1297–1304. DOI: 10.1007/s40195-018-0754-0.
5. Луц А.Р., Галочкина И.А. Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего / сост. А.Р. Луц, И.А. Галочкина. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 82 с.
6. Vorozhtsov S., Zhukov I., Promakhov V., Naydenkin E., Khrustalyov A., Vorozhtsov A. The influence of ScF3 nanoparticles on the physical and mechanical properties of new metal matrix composites based on A356 aluminum alloy // JOM. 2016. V. 68. No. 12. P. 3101–3106. DOI: 10.1007/s11837-016-2141-5.
7. Weber J.H., Schelleng R.D. Dispersion-Strengthened Aluminum Alloys / ed. By Y.-W. Kim, W.M. Griffith. Warrendale: TMS, 1988. P. 468.
8. Orowan E. // Proceedings of Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys. Institute of Metals. London, 1948. P. 451–454.
9. Stewart A.T., Martin J.W. Dislocation-particle interactions in plastically deformed two-phase aluminium crystals // Acta Materialia. 1975. V. 23. P. 1–7. DOI: 10.1016/0001-6160(75)90062-0.
10. 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. P. 1103-1–1103-18. DOI: 10.3390/cryst10121103.
11. Wang G., Wang Q., Easton M.A., Dargusch M.S., Qian M., Eskin D.G., Stjohn D.H. Role of ultrasonic treatment, inoculation and solute in the grain refinement of commercial purity aluminium // Scientific Reports. 2017. V. 7. Article number 9729. DOI: 10.1038/s41598-017-10354-6.
12. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: Ten years later // JOM. 2016. V. 68. No. 4. P. 1216–1226. DOI: 10.1007/s11837-016-1820-6.
13. Vorozhtsov S., Minkov L., Khrustalyov A., Dammer V., Zhukov I., Promakhov V., Vorozhtsov A., Khmeleva M. Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: modeling and experiment // JOM. 2017. V. 69. No. 12. P. 2653–2657. DOI: 10.1007/s11837-017-2594-1.
14. Ворожцов А.Б., Платов В.В., Козулин А.А., Хрусталев А.П., Мишин И.П., Жуков И.А. Исследование влияния частиц TiB₂ на структуру, деформационное поведение и свойства алюминиевого сплава 1550 // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика 2020. № 67. С. 102–116. DOI: 10.17223/19988621/67/10.
15. Ashby M.F., Johnson K. Materials and Design, the Art and Science of Materials Selection in Product Design. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002. 390 p.
16. Gould D., Hirsch P.B., Humphreys F.J. The Bauschinger effect, work-hardening and recovery in dispersion-hardened copper crystals // The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. 1974. V. 30. No. 6. P. 1353–1377. DOI: 10.1080/14786437408207287.

17. *Humphreys F.J., Martin J.W.* The effect of dispersed phases upon dislocation distributions in plastically deformed copper crystals // *Philosophical Magazine*. 1967. V. 16. No. 143. P. 927–957. DOI: 10.1080/14786436708229685.
18. *Kröppl O., Vöhringer E.* Creep behavior of dispersion-hardened aluminum materials // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 1999. V. 3. P. 1–13. DOI: 10.1023/A:1009875316242.
19. *Кулаева Н.А., Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Старенченко В.А.* Влияние масштабных характеристик упрочняющей фазы со сверхструктурой L12 на эволюцию дислокационных диполей в процессе пластической деформации // *Вестник Тамбовского университета*. Серия: естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1089–1092. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1089-1092.
20. *Ковалевская Т.А., Колупаева С.Н., Данейко О.И., Кулаева Н.А., Семенов М.Е.* Влияние масштабных характеристик упрочняющей фазы на эволюцию дефектной подсистемы в гетерофазных материалах с ГЦК матрицей // *Материаловедение*. 2011. № 8. С. 6–11.
21. *Stacey A., Webster G.A.* Determination of residual stress distributions in autofrettaged tubing // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998. V. 31. No. 3. P. 205–220. DOI: 10.1016/0308-0161(88)90003-8.
22. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 231 с.
23. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Остаточные напряжения в трубе из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами после разгрузки из упругопластического состояния // *Изв. вузов. Физика*. 2018. Т. 61. № 4. С. 113–124.
24. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Влияние размеров упрочняющих наночастиц на остаточные напряжения в трубе из дисперсно-упрочнённого сплава // *Изв. вузов. Физика*. 2018. Т. 61. № 5. С. 140–150.
25. *Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T.* Mathematical modeling of nanodispersed hardening of FCC materials // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2018. V. 31. No. 12. P. 1297–1304. DOI: 10.1007/s40195-018-0754-0.
26. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Исследование влияния распределения температуры на напряжённо-деформированное состояние стенок трубы из дисперсно-упрочнённого сплава // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020. Т. 17. № 3. С. 330–337. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2020.03.008.
27. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Исследование пластической деформации толстостенной трубы из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами // *Изв. вузов. Физика*. 2017. Т. 60. № 2. С. 35–45.
28. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Напряженно-деформируемое состояние нагруженной трубы из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами // *Изв. вузов. Физика*. 2017. Т. 60. № 4. С. 7–13.
29. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Исследование формирования дислокационной структуры нагруженной внутренним давлением трубы из сплава, упрочненного некогерентными наночастицами // *Изв. вузов. Физика*. 2017. Т. 60. № 7. С. 133–141.
30. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Упругопластическая деформация трубы из дисперсно-упрочненного алюминия под действием внешнего давления // *Изв. вузов. Физика*. 2018. Т. 61. № 8. С. 138–145.
31. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Упругопластическая деформация трубы из дисперсно-упрочненного алюминия под действием внешнего и внутреннего давления // *Изв. вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 4. С. 144–151.
32. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Напряженное состояние стенок трубы из дисперсно-упрочненного алюминия под действием внешнего и внутреннего давления // *Изв. вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 10. С. 50–57.
33. *Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T.* Mathematical modeling of plastic deformation of a tube from dispersion-hardened aluminum alloy // *MATEC Web of conferences*. 2018. V. 243. P. 00008-1-00008-6. DOI: 10.1051/mateconf/201824300008.
34. *Матвиенко О.В., Данейко О.И., Ковалевская Т.А.* Напряженное состояние стенок составной трубы из дисперсно-упрочненного алюминия под действием внутреннего давления // *Изв. вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 5. С. 64–73.

35. 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.
36. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of Elasticity. New York: Mcgraw Hill, 2010. 567 p.
37. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение. 1975.

Статья поступила 01.12.2020

Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2021) A STUDY OF RESIDUAL STRESS FORMATION AFTER ELASTOPLASTIC DEFORMATION OF PIPE WALLS, MADE FROM DISPERSE-HARDENED ALUMINUM ALLOY, AS A RESULT OF EXTERNAL PRESSURE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 72. pp. 102–117

DOI 10.17223/19988621/72/9

Keywords: dispersion-hardened materials, nanoscale particles, plastic deformation, mathematical model, strain hardening, unloading, residual stresses.

The formation of residual stresses after elastic-plastic deformation of pipe walls as a result of external pressure is studied using the approach based on a combination of methods of the physical theory of plasticity and mechanics of a deformable solid. As a result of the research, it is found that at the same value of the applied pressure, the thickness of the area subjected to plastic deformation is less for the alloys reinforced with large particles than for those reinforced with small particles. The values of the circumferential and axial residual stresses exceed the value of the radial residual stresses by more than an order of magnitude. Therefore, in the first approximation, the radial residual stresses can be neglected.

Financial support. This work was performed with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 17-13-01252).

Oleg V. MATVIENKO (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: matvolegv@mail.ru

Olga I. DANAYKO (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: olya_dan@mail.ru

Tat'yana A. KOVALEVSKAYA (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: takov47@mail.ru

REFERENCES

1. Matthews F., Rawlings R. (2004) *Kompozitnye materialy* [Composite materials]. Moscow: Tekhnosfera.
2. Karabasov Yu.S. (2002) *Novye materialy* [New materials]. Moscow: MISSIS.
3. Arnhold V., Hummert K. (1989) *New Materials by Mechanical Alloying Techniques*. Ed. by E. Arzt, L. Schultz. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft Verlag.
4. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. (2018) Mathematical modeling of nanodispersed hardening of FCC materials. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 31(12), pp. 1297–1304. DOI: 10.1007/s40195-018-0754-0.
5. Luts A.R., Galochkina I.A. (2013) *Alyuminiyevye kompozitsionnye splavy – splavy budushchego* [Aluminum composite alloys – alloys of the future]. Samara: Samara State Technical University.
6. Vorozhtsov S., Zhukov I., Promakhov V., Naydenkin E., Khrustalyov A., Vorozhtsov A. (2016) The influence of ScF3 nanoparticles on the physical and mechanical properties of new

- metal matrix composites based on A356 aluminum alloy. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 68(12). pp. 3101–3106. DOI: 10.1007/s11837-016-2141-5.
7. Weber J.H., Schelleng R.D. (1988) *Dispersion-Strengthened Aluminum Alloys*. Ed. by Y.-W. Kim, W.M. Griffith. Warrendale: TMS.
 8. Orowan E. (1948) *Proceedings of Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys*. London: Institute of Metals.
 9. Stewart A.T., Martin J.W. (1975) Dislocation-particle interactions in plastically deformed two-phase aluminum crystals. *Acta Materialia*. 23. pp. 1–7. DOI: 10.1016/0001-6160(75)90062-0.
 10. 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. pp. 1103-1–1103-18. DOI: 10.3390/cryst10121103.
 11. Wang G., Wang Q., Easton M.A., Dargusch M.S., Qian M., Eskin D.G., Stjohn D.H. (2017) Role of ultrasonic treatment, inoculation and solute in the grain refinement of commercial purity aluminium. *Scientific Reports*. 7. Article 9729. DOI: 10.1038/s41598-017-10354-6.
 12. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y. (2016) Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 68(4). pp. 1216–1226. DOI: 10.1007/s11837-016-1820-6.
 13. Vorozhtsov S., Minkov L., Khrustalyov A., Dammer V., Zhukov I., Promakhov V., Vorozhtsov A., Khmeleva M. (2017) Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: modeling and experiment. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 69(12). pp. 2653–2657. DOI: 10.1007/s11837-017-2594-1.
 14. Vorozhtsov A.B., Platov V.V., Kozulin A.A., Khrustalev A.P., Mishin I.P., Zhukov I.A. (2020) Issledovanie vliyaniya chastic TiB2 na strukturu, deformatsionnoe povedenie i svoystva alyuminievogo splava 1550 [Study of the effect of TiB2 particles on the structure, deformation behavior, and properties of the aluminum alloy 1550]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 67. pp. 102–116. DOI: 10.17223/19988621/67/10.
 15. Ashby M.F., Johnson K. (2002) *Materials and Design, the Art and Science of Materials Selection in Product Design*. Oxford: Butterworth Heinemann.
 16. Gould D., Hirsch P.B., Humphreys F.J. (1974) The Bauschinger effect, work-hardening and recovery in dispersion-hardened copper crystals. *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 30(6). pp. 1353–1377. DOI: 10.1080/14786437408207287.
 17. Humphreys F.J., Martin J.W. (1967) The effect of dispersed phases upon dislocation distributions in plastically deformed copper crystals. *Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*. 16(143). pp. 927–957. DOI: 10.1080/14786436708229685.
 18. Kröpfel O., Vöhringer E. (1999) Creep behavior of dispersion-hardened aluminum materials. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 3. pp. 1–13. DOI: 10.1023/A:1009875316242.
 19. Kulaeva N.A., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A., Starenchenko V.A. (2016) Vliyanie masshtabnykh kharakteristik uprochnyayushchey fazy so sverkhstrukuroy L12 na evolyutsiyu dislokatsionnykh dipoley v protsesse plasticheskoy deformatsii [Influence of the scale characteristics of the hardening phase with the L12 superstructure on the evolution of dislocation dipoles during plastic deformation]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 21(3). pp. 1089–1092. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1089-1092.
 20. Kovalevskaya T.A., Kolupaeva S.N., Daneyko O.I., Kulaeva N.A., Semenov M.E. (2011) Vliyanie masshtabnykh kharakteristik uprochnyayushchey fazy na evolyutsiyu defektnoy podsistemy v geterofaznykh materialakh s GTSK matritsey [Influence of the scale characteristics of the hardening phase on the evolution of the defect subsystem in heterophase materials with an FCC matrix]. *Materialovedenie*. 8. pp. 6–11.
 21. Stacey A., Webster G.A. (1998) Determination of residual stress distributions in autofrettaged tubing. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 31(3). pp. 205–220. DOI: 10.1016/0308-0161(88)90003-8.

22. Birger I.A. (1963) *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz.
23. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2018) Ostatochnye napryazheniya v trube iz splava, uprochnennogo nekogerentnymi nanochastitsami posle razgruzki iz uprugoplasticheskogo sostoyaniya [Residual stresses in a pipe made of an alloy strengthened by incoherent nanoparticles after unloading from an elastoplastic state]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 61(4). pp. 113–124.
24. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2018) Vliyaniye razmerov uprochnyayushchikh nanochastits na ostatochnye napryazheniya v trube iz dispersno-uprochnennogo splava [Influence of the size of hardening nanoparticles on residual stresses in a pipe made of a dispersion-hardened alloy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 61(5). pp. 140–150.
25. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. (2018) Mathematical modeling of nanodispersed hardening of FCC materials. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 31(12). pp. 1297–1304. DOI: 10.1007/s40195-018-0754-0.
26. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2020) Issledovaniye vliyaniya raspredeleniya temperatury na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye stenok truby iz dispersno-uprochnennogo splava [Investigation of the influence of temperature distribution on the stress-strain state of the tube walls made from a disperse-hardened alloy]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya – Basic Problems of Material Science*. 17(3). pp. 330–337. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2020.03.008.
27. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2017) Issledovaniye plasticheskoy deformatsii tolstostennoy truby iz splava, uprochnennogo nekogerentnymi nanochastitsami [Investigation of plastic deformation of a thick-walled tube made of the alloy reinforced with incoherent nanoparticles]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 60(2). pp. 35–45.
28. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2017) Napryazhenno-deformiruemoye sostoyaniye nagruzhennoy truby iz splava, uprochnennogo nekogerentnymi nanochastitsami [Stress-strain state of the loaded pipe made of the alloy reinforced with incoherent nanoparticles]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 60(4). pp. 7–13.
29. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2017) Issledovaniye formirovaniya dislokatsionnoy struktury nagruzhennoy ravnomernym vnutrennim davleniem truby iz splava, uprochnennogo nekogerentnymi nanochastitsami [Investigation of the formation of a dislocation structure loaded with uniform internal pressure in a pipe made of the alloy reinforced with incoherent nanoparticles]. *Russian Physics Journal*. 60(7). pp. 133–141.
30. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2018) Uprugoplasticheskaya deformatsiya truby iz dispersno-uprochnennogo alyuminiya pod deystviem vneshnego davleniya [Elastoplastic deformation of a pipe made of dispersion-hardened aluminum under the influence of external pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 61(8). pp. 138–145.
31. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2019) Uprugoplasticheskaya deformatsiya truby iz dispersno-uprochnennogo alyuminiya pod deystviem vneshnego i vnutrennego davleniya [Elastoplastic deformation of a pipe made of dispersion-hardened aluminum under external and internal pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 62(4). pp. 144–151.
32. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2019) Napryazhennoe sostoyaniye stenok truby iz dispersno-uprochnennogo alyuminiya pod deystviem vneshnego i vnutrennego davleniya [Stress state of the pipe walls made of dispersion-hardened aluminum under external and internal pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 62(10). pp. 50–57.
33. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. (2018) Mathematical modeling of plastic deformation of a tube from dispersion-hardened aluminum alloy. *MATEC Web of conferences*. 243. pp. 00008-1–00008-6. DOI: 10.1051/mateconf/201824300008.
34. Matvienko O.V., Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A. (2020) Napryazhennoe sostoyaniye stenok sostavnoy truby iz dispersno-uprochnennogo alyuminiya pod deystviem vnutrennego

- davleniya [Stress state of walls of the composite pipe made of dispersion-hardened aluminum under internal pressure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 63(5). pp. 64–73.
35. Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A., Matvienko O.V. (2018) Vliyanie nanorazmernykh nekogerentnykh chastits na prochnostnuyu termicheskuyu stabil'nost' legkikh spлавov na osnove alyuminiya [Influence of nanosized incoherent particles on the strength thermal stability of the light aluminum-based alloys]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 61(7). pp. 40–46.
 36. Timoshenko S.P., Goodier J.N. (2010) *Theory of Elasticity*. New York: McGraw Hill.
 37. Malinin N.N. (1975) *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie.

Received: December 1, 2020