

В итоге разработан ряд моделей, позволяющих в автоматизированном режиме построить трехмерный аналог по основным геометрическим размерам, вычислить эффективные вязкоупругие механические характеристики оболочки для заданной схемы армирования и определить их на всех участках с учетом изменения угла армирования на сферических участках. Реализован алгоритм решения задач об отыскании напряженно-деформированного состояния конструкции на каждом этапе изготовления.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сметанников О.Ю., Сахабутдинова Л.Р., Ильиных Г.В. Численное моделирование процесса изготовления крупногабаритного композитного кокона с учетом термовязкоупругости // Вестник томского государственного университета. – 2022. – № 76. – С. 165–181.

## УРАВНЕНИЕ КОНСЕРВАТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОРОГОВ НА ВИНТОВЫХ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СЕГМЕНТАХ В ГЦК-МЕТАЛЛАХ

Д.Н. Черепанов<sup>1</sup>, О.В. Селиваникова<sup>2</sup>

1. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

1. Томский архитектурно-строительный университет

2. Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: d\_n\_ch@mail.ru

Для моделирования процессов в пластически деформируемых металлах и сплавах, основанного на концепции упрочнения и отдыха [1], требуется выражение для интенсивности генерации точечных дефектов [2], содержащее концентрацию порогов на винтовых дислокационных сегментах  $c_j = 1/\Lambda_j$  (рис. 1). Если предположить, что при малом расстоянии между порогами скорость их движения может и близко не приближаться к скорости звука, поскольку пороги аннигилируют быстрее, чем они разгонятся до высоких скоростей, то движение элементарных порогов можно рассматривать как скольжение прямолинейных краевых дислокационных сегментов и для моделирования достаточно рассмотреть уравнение движения «материальных точек» с координатой  $x$  и массой  $m \approx 0,1\mu c_i^{-2}(1-\nu)^{-1}$ .

Движение порогов происходит в направлении равнодействующей силы взаимодействия порогов  $\mu(4\pi(1-\nu)x)^{-1}$ , где  $2x$  уменьшается от среднего расстояния между порогами  $c_j^{-1}$  до  $b$ , силы трения, сопротивляющейся движению порога  $\tau_f b$ , и проекций линейных натяжений  $\mu \cos \varphi_1$  и  $\mu \cos \varphi_2$  винтовых сегментов по обе стороны от порога, где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - углы между направлениями линейных натяжений и линией дислокации. В металлах и сплавах с низкой энергией дефекта упаковки, помимо этого, требуется учесть работу  $\gamma_{SFE}bx$  по созданию дефекта упаковки на пути движения порога, а в L12-сплавах – работу  $\gamma_{A\Phi\Gamma}2bx$  по созданию трубки антифазной границы [3]. В случае, когда твёрдорастворное упрочнение связано с уменьшением энергии дефекта упаковки, это влияние учитывается повышением значения  $\tau_f$ .

Поскольку проекции линейных натяжений требуется выразить через  $2x$ , то для правого порога можно воспользоваться формулами  $\tau = \mu x^{-1}b^{-1} \sin \varphi_1 = 2\mu(1,5c_j^{-1} - |x|)^{-1}b^{-1} \sin \varphi_2 = \alpha G b \rho^{1/2}$ , где  $\rho$  – плотность дислокаций. Тогда равнодействующая проекций линейных натяжений на ось с направлением  $\vec{v}$  по абсолютной величине равна

$\mu(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) = \mu \left( \sqrt{1 - (\tau x b \mu^{-1})^2} - \sqrt{1 - (0,5\tau(1,5c_j^{-1} - |x|)b\mu^{-1})^2} \right)$ , а уравнение движения имеет вид

$m \ddot{x} = -\gamma_{A\Phi\Gamma} + \mu \left( 4\pi(1-\nu)|x|^{-1} + \sqrt{1 - 4\alpha^2\rho x^2} - \sqrt{1 - \alpha^2\rho(1,5c_j^{-1} - |x|)^2} \right)$ , где  $B_0$  – коэффициент вязкого

торможения. Начальные условия:  $\dot{x}(0) = 0$ ,  $|x(0)| = 0,5c_j^{-1}$ .

первоначальное состояние дислокационного сегмента с порогами на равном расстоянии

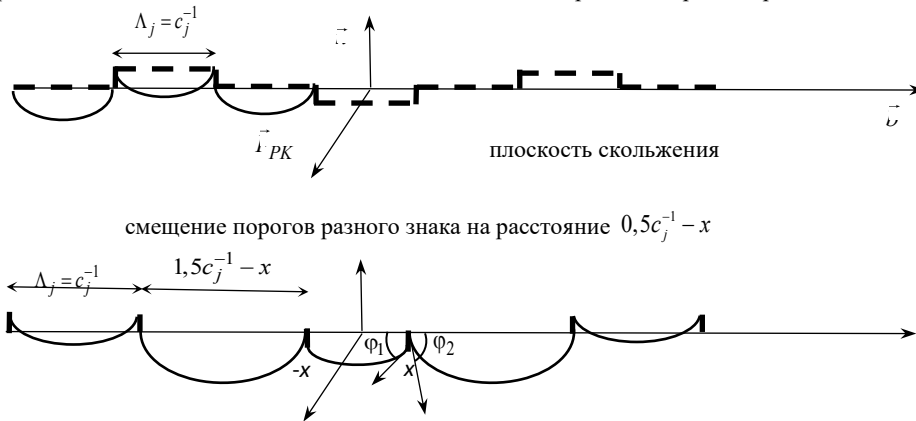


Рис. 1. Схема движения порогов разного знака вдоль линии дислокации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старенченко В.А., Черепанов Д.Н., Слободской М.И. Кинетика порогов на движущейся винтовой дислокации в ГЦК – кристалле // Изв. ВУЗов. Физика. – 2009, № 9/2, с. 108-117.
2. Старенченко В.А., Черепанов Д.Н., Селиванова О.В. Моделирование пластической деформации кристаллических материалов на основе концепции упрочнения и отдыха в ГЦК-металлах // Изв. ВУЗов. Физика. – 2014, том. 57, № 2, с. 4-14.
3. Старенченко В.А., Старенченко С.В., Колупаева С.Н., Пантюхова О.Д. Генерация точечных дефектов в сплавах со сверхструктурой L12 // Изв. ВУЗов. Физика. – 2000, № 1. с. 66-70.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.М. Емельянов, И.С. Надеждин, С.Н. Ливенцов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ame8@tpu.ru](mailto:ame8@tpu.ru)

ГК «Росатом» реализует проект «Прорыв», направленный на создание ядерных энергетических технологий на базе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с использованием реакторов на быстрых нейтронах. В рамках проекта «Прорыв» создается модуль переработки опытного демонстрационного энергетического комплекса (МП ОДЭК), в котором предусмотрено использование экстракционного передела. В рамках цифровизации производств остро ощущается потребность в математических моделях технологических процессов (ТП), обладающих высокой точностью и учитывающих их ключевые особенности. Перспективным методом моделирования сложных ТП является использование искусственных нейронных сетей (ИНС), которые позволят повысить точность моделей процессов.

Целью настоящей работы является разработка математической модели технологического процесса экстракции с применением ИНС для дальнейшего использования модели в составе цифрового двойника (ЦД) МП и