©Кудряшов Н. А., Муратов Р. В., Рябов П. Н., 2016

DOI: 10.18255/1818-1015-2016-3-298-308

УДК 539.42

Численное моделирование процессов формирования полос адиабатического сдвига в композитах

Кудряшов Н. А., Муратов Р. В., Рябов П. Н.

получена 15 марта 2016

Аннотация. В работе рассматривается процесс локализации пластической деформации в композитном материале, состоящем из сваренных стальной и медной пластины при сдвиговых деформациях. Сформулирована математическая модель данного физического процесса. Для проведения вычислительных экспериментов предложен новый численный алгоритм, основанный на схеме Куранта–Изаксона–Риса. Данный алгоритм верифицирован на трех тестовых задачах. Его работоспособность и эффективность подтверждена в результате проведенных тестов. С использованием предложенного алгоритма проведено численное моделирование процессов локализации пластической деформации в композитных материалах. Исследовано влияние граничных условий, начальной скорости пластической деформации и ширины материалов, входящих в композитный блок, на процесс локализации. Показано, что на начальном этапе скорость сдвига слоев материала колеблется. Предложены теоретические оценки частоты и периода колебаний, расчеты по которым полностью согласуются с численным экспериментом. Установлено, что деформация локализуется в медной части композита. В зависимости от ширины стальной и медной части, а также начальной скорости пластической деформации и выбранного типа граничных условий, возникает одна или две области локализации, расположенные на характерном расстоянии от границ. Показана зависимость данного расстояния от начальной скорости пластической деформации, и получены соответствующие оценки для двух типов граничных условий. Установлено, что при возникновении двух областей локализации в одной из них температура и деформация растут существенно быстрее, чем в другой, тогда как на начальном этапе данные величины совпадают в этих областях.

Ключевые слова: полоса сдвига, локализация деформации, пластическая деформация, численное моделирование

Для цитирования: Кудряшов Н. А., Муратов Р. В., Рябов П. Н., "Численное моделирование процессов формирования полос адиабатического сдвига в композитах", *Моделирование и анализ информационных систем*, **23**:3 (2016), 298–308.

Об авторах:

Кудряшов Николай Алексеевич, orcid.org/0000-0001-5926-9715, д-р. физ.-мат. наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия, e-mail: nakudr@gmail.com

Муратов Родион Владимирович, orcid.org/0000-0002-4574-4412, студент, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия, e-mail: rodyon-mur@yandex.ru

Рябов Павел Николаевич, orcid.org/0000-0002-3780-9204, канд. физ.-мат. наук, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия, e-mail: pnryabov31@gmail.com

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект для поддержки исследований, проводимых отдельными научными группами, № 14-11-00258

Введение

Исследованию природы процессов формирования полос адиабатического сдвига (ПАС) в материалах при деформациях в последнее десятилетие уделяется большое внимание. Это связано с тем, что данное явление наблюдается в технологических процессах обрабатывающей, атомной и космической промышленности, а также во многих физических экспериментах и является одной из основных причин отказа материалов при высокоскоростных деформациях. Примеры таких процессов встречаются при пробивании материала на высоких скоростях, при обработке материала давлением, при механической обработке материала при прессовании и т.д. [1–5]. В работах [6, 7] отмечалось явление формирования ПАС, возникающих при работе ядерного реактора, а в работах [8, 9] – при запуске и крушении космических аппаратов.

По существу, данное явление представляет собой очень узкие области шириной от 1 до 500 мкм, в которых за короткое время достигаются существенные деформации и температуры. Причиной образования полос сдвига является потеря устойчивости пластического течения, возникающая вследствие эффекта термического разупрочнения [10]. Согласно этой теории, в условиях, близких к адиабатическим, работа пластической деформации переходит в тепло, что и вызывает термическое разупрочнение материала и приводит к образованию полос адиабатического сдвига.

Одной из первых экспериментальных работ по исследованию процессов формирования ПАС является работа Марчанда и ДUFFи [11] по коаксиальному нагружению тонкостенных стальных образчиков Кольски [12]. По результатам эксперимента авторы установили, что в области шириной около 20 мкм температура образца достигла 863 К, а деформация – 1900%. Главным недостатком методики [11] является низкое значение максимальной скорости пластической деформации материала, создаваемое экспериментальными установками. Следующим этапом развития экспериментальных исследований по изучению процессов формирования ПАС стала работа Нестеренко [13]. Авторы разработали методику нагружения стальных и титановых образцов, благодаря которой удалось достичь начальной скорости деформации $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$. Авторы показали, что в процессе нагружения образуются несколько полос сдвига, число которых увеличивается с ростом начальной скорости деформации. Помимо экспериментальных работ, данное явление интенсивно изучается с использованием теоретических подходов [14–18]. Однако отметим, что подавляющее большинство данных работ сконцентрировано на исследовании процессов формирования ПАС в определенном материале. Таким образом, интерес представляет изучение процессов формирования ПАС в композитах, состоящих из разных по своим теплофизическим свойствам материалов.

1. Математическая модель

Рассмотрим процесс сдвиговой деформации бесконечного бруса, представляющего собой сплав двух разных по своим теплофизическим свойствам материалов. Общая высота бруса равна H . Нижняя граница бруса зафиксирована, а верхняя перемещается с постоянной скоростью v_B вдоль оси x . В такой постановке все параметры материала (смещение частиц, скорость, температура, и т.д.) зависят только от ко-

ординаты y , а отличной от нуля компонентой тензора напряжений является компонента τ_{xy} . Обозначим $u(y, t)$ – смещение частиц материала, $\tau_{xy} = \tau$ – напряжение. В данных обозначениях математическая модель, описывающая процессы формирования полос адиабатического сдвига примет вид:

$$v_t = \frac{1}{\rho} \tau_y, \quad (1)$$

$$\tau_t - \mu v_y = -\mu \dot{\varepsilon}^p, \quad (2)$$

$$\psi_t = \frac{\tau \dot{\varepsilon}^p}{\kappa(\psi)}, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \Phi^{-1}(T, \psi, \tau), \quad (4)$$

$$C \rho T_t = (k T_y)_y + \beta \tau \dot{\varepsilon}^p, \quad (5)$$

где y – пространственная переменная, t – время, v – скорость, T – температура, $\dot{\varepsilon}^p$ – скорость пластической деформации, ρ – плотность, β – параметр Тейлора–Куни, μ – модуль упругого сдвига, C – удельная теплоемкость, k – коэффициент теплопроводности, функция $g(T)$ описывает чувствительность материала к изменению температуры.

Поскольку процесс формирования ПАС сопровождается высокими температурами и деформациями, в материале могут иметь место фазовые переходы. В рассматриваемой нами модели не учитываются процессы подобного рода.

В качестве начальных условий, описывающих состояние системы при $t = 0$, выбраны условия

$$\begin{aligned} v(y, 0) = v_0(y), \quad T(y, 0) = T_0(y), \quad \tau(y, 0) = \tau_0(y), \\ \psi(y, 0) = \psi_0, \quad \dot{\varepsilon}^p(y, 0) = \dot{\varepsilon}_0, \quad \varepsilon(y, 0) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Граничные условия на скорость примут вид

$$v(0, t) = 0, \quad v(H, t) = v_B. \quad (7)$$

В качестве граничных условий на температуру использованы либо граничные условия 1-го, либо 2-го рода

$$\begin{aligned} T(y = 0, t) = 0, \quad T(y = H, t) = 0, \\ T_y(y = 0, t) = 0, \quad T_y(y = H, t) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Отметим, что также могут быть использованы граничные условия других типов, примеры которых могут быть найдены в работах [14–16].

Используемые в расчетах материалы, из которых изготовлен блок, представляют собой лигированную низкоуглеродистую сталь марки НУ-100, которая применяется при изготовлении тяжелого строительного оборудования, камер высокого давления, а также бескислородную медь ОФНС, обладающую высокой проводимостью и используемую для изготовления различных типов кабелей. Теплофизические и пластические параметры данных материалов приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические параметры используемых материалов
Table 1. Thermophysical properties of materials

Материал Material	μ , ГПа GPa	ρ , кг/м ³ kg/m ³	k , Вт/мК W/mK	C , Дж/кгК J/kgK	$\dot{\varepsilon}_y$, с ⁻¹ с ⁻¹	a , К ⁻¹ K ⁻¹	κ_0 , МПа MPa	m	ψ_0	n
НУ-100	80	7860	49.2	473	10 ⁻⁴	6.43·10 ⁻⁴	600	0.0251	0.012	0.107
ОГНС	45	8960	386	383	1	9.47·10 ⁻⁴	69	0.027	0.261	0.32

Закон пластической текучести (4) используется в форме

$$\tau = \kappa(\psi)g(T) \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_y}\right)^m. \quad (9)$$

Для проведения численных расчетов соотношение (9) следует разрешить относительно величины скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}^p$ с учетом того, что $\dot{\varepsilon}^p \geq 0$. В результате имеем

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{\dot{\varepsilon}_y}{2} \left(\left[\frac{|\tau|}{\kappa(\psi)g(T)} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right) \left(1 + \text{sign} \left[\left[\frac{|\tau|}{\kappa(\psi)g(T)} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \right). \quad (10)$$

Функция температурного сглаживания материала выбирается в экспоненциальном виде для стали

$$g(T) = \exp(-aT), \quad (11)$$

и степенном для меди

$$g(T) = (1 - aT)^3. \quad (12)$$

Функция $\kappa(\psi)$ выражается формулой

$$\kappa(\psi) = \kappa_0 \left(1 + \left(\frac{\psi}{\psi_0} \right)^n \right). \quad (13)$$

В случае, если этот эффект не учитывается, в (9) используется константное значение $\kappa = \kappa_0$, а уравнение (3) исключается из системы.

Численное решение задачи (1)–(5) строится аналогично алгоритму, предложенному в работе [17], с некоторой модификацией. На первом этапе решается механическая часть задачи, т.е. определяются значения скорости v и напряжения τ в композитном блоке. Разностная аппроксимация системы уравнений (1)–(2) для определения величин v и τ строится на основе схемы Куранта–Изаксона–Риса [19] с использованием итераций по Ньютону. Затем на основе полученных значений рассчитывается величина скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}^p$ и деформации ε^p . Скорость пластической деформации определяется из закона пластической текучести (4), а величина деформации вычисляется при помощи метода трапеций, путем интегрирования величины $\dot{\varepsilon}^p$ по времени. В свою очередь, величина деформационного упрочнения ψ рассчитывается при помощи метода Рунге–Кутты [17]. Второй этап решения задачи (1)–(5) заключается в определении температуры образца. С

этой целью интегрирование последнего уравнения (5) проводится с использованием неявной конечно-разностной схемы.

Верификация разработанного численного алгоритма строилась на основе решения трех тестовых задач [14, 15, 17, 18]. В первой задаче исследуется формирование одиночной полосы адиабатического сдвига в центре стального бруса без учета процесса деформационного упрочнения. Вторая задача заключается в исследовании влияния деформационного упрочнения на процесс формирования полосы сдвига в образце, изготовленном из бескислородной меди. Третья задача состоит в исследовании процесса самоорганизации полос адиабатического сдвига в медных и стальных образцах [17]. Во всех трех случаях разработанный алгоритм иллюстрирует свою работоспособность, а полученные результаты полностью согласуются с результатами, полученными в [14, 15, 17, 18].

2. Результаты численного моделирования

Рассмотрим процесс формирования ПАС в материале, состоящем из спаянных друг с другом образцов из стали НУ-100 и меди ОФНС. Плоскость соприкосновения материалов проходит параллельно грани пластины в точке $y = \gamma H$, где $\gamma \in (0, 1)$. Для описания ширины стальной и медной части введем обозначение: x мм – z мм, где x – высота стальной части, z – высота медной части.

На границах либо температура, либо тепловой поток поддерживается равным нулю. Напряжение, температура, фактор ψ и скорость пластической деформации в начальный момент равны нулю. Предполагается, что скорость изменяется линейно. Формирование ПАС будем исследовать при различных коэффициентах $\dot{\epsilon}_0$, H и γ .

На начальных этапах численного эксперимента, независимо от параметров $\dot{\epsilon}_0$, H и γ , поведение величин одинаково. Поскольку напряжение в стали на порядок выше, чем в меди, на границе раздела возникает большой градиент напряжения. Отношение ускорений материала слева от раздела сред (в стали) и справа (в меди) отличается на порядок.

$$\frac{v_{ст}}{v_{м}} \approx \frac{\rho_{м}}{\rho_{ст}} \frac{\kappa_{0ст}}{\kappa_{0м}} \approx 10, \quad (14)$$

из-за чего скорость в точке раздела сред испытывает разрыв и слева (в стали) уменьшается значительно быстрее. Далее возмущение идет по стали к точке $y = 0$, где волна отражается от закрепленной границы, а после возвращается к границе между материалами и передает часть энергии меди. На Рис. 1 представлены этапы распространения волны от точки спайки двух материалов.

График зависимости скорости от времени в точках $y < \gamma H$ довольно точно описывается формулой затухающих колебаний с периодом и частотой около

$$T = 4\gamma H \sqrt{\frac{\rho_{ст}}{\mu_{ст}}}, \quad \omega = \frac{\pi}{2\gamma H} \sqrt{\frac{\mu_{ст}}{\rho_{ст}}}. \quad (15)$$

Численные расчеты показывают, что частота колебаний точек материала отличается от приведенной оценки не более чем на 5%.

В результате затухающих периодических колебаний стали, возмущение и часть энергии передается медной части сплава, где в дальнейшем возможна локализация

Рис. 1. Распределение скоростей в образце в различные моменты времени при $\dot{\varepsilon}_0 = 10^5 \text{ c}^{-1}$ и $H = 4$ (2 мм – 2 мм). (a) – $\varepsilon_{\text{ном}} \in [0.032, 0.13]$; (b) – $\varepsilon_{\text{ном}} \in [0.162, 0.259]$

Fig. 1. The velocity distribution in the specimen at different times at $\dot{\varepsilon}_0 = 10^5 \text{ c}^{-1}$ and $H = 4 \text{ mm}$ (2 mm – 2 mm). (a) – $\varepsilon_{\text{ном}} \in [0.032, 0.13]$; (b) – $\varepsilon_{\text{ном}} \in [0.162, 0.259]$

пластических деформаций и возникновение нескольких ПАС. К моменту их формирования стальная часть пластины уже практически полностью постоит.

Далее изучим подробнее процессы, происходящие в медной части образца. В зависимости от начальной скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0$ кардинально меняются характерные распределения величин, возможно возникновение от одной до нескольких полос сдвига в различных местах медной части.

Рис. 2. Распределение скорости и температуры в образце толщиной $H = 10 \text{ mm}$ (2 мм – 8 мм) в различные моменты времени при $\dot{\varepsilon}_0 = 10^3 \text{ c}^{-1}$. (a) – скорость; (b) – температура

Fig. 2. The velocity and temperature distribution in specimen with $H = 10 \text{ mm}$ (2 mm – 8 mm) at $\dot{\varepsilon}_0 = 10^3 \text{ c}^{-1}$. (a) – velocity; (b) – temperature

Численные эксперименты показывают, что на начальной стадии процесса распределение температуры, деформации и скорости деформации почти симметричны в медной части пластины и имеют один (пластины 1 мм – 4 мм, 2 мм – 3 мм, 2 мм – 6 мм) или два локальных максимума около середины (пластины 2 мм – 8 мм). Однако, начиная с некоторого момента времени, максимальное значение соответствующих величин за короткий промежуток времени увеличивается в несколько раз. В случае наличия двух локальных максимумов, как например в образце 2 мм – 8 мм, наблюдается резкое увеличение правого из них, что обусловлено, по-видимому, дополнительным температурным градиентом на границе образца, см. Рис. 2. Также из Рис. 2 видно, что начиная с некоторого момента времени распределение скорости в образце приобретает ступенчатый вид, причем вся стальная часть и существенная часть меди покоятся.

На Рис. 3 приведены зависимости максимальных значений температуры, деформации, скорости деформации и минимума напряжения от времени для всех испытанных образцов. Из Рис. 3 видно, что начало формирования полосы адиабатического сдвига приходится на момент времени $\varepsilon_{\text{ном}}$ от 1.2 до 2.2 для образцов различной толщины. Можно заметить, что чем больше толщина меди, тем позднее образуется ПАС. Далее, за короткий промежуток времени пик температуры возрастает в 2-3 раза, а деформации в 4-5 раз.

В данной серии экспериментов образование по крайней мере одной ПАС в середине медной части неизбежно. Стальная часть пластины практически не нагревается, поэтому на левой границе меди (в точке раздела материалов) температура очень мала, на правой же границе меди температура поддерживается равной нулю. Медная часть постоянно получает энергию из-за движения правой границы и нагревается, при таких условиях около середины медной части образца обязательно образуется не менее одного, постоянно увеличивающегося максимума температуры.

Влияние граничных условий на процесс локализации оказывается существенным, о чем говорят численные эксперименты с нулевым потоком тепла на границах. В этом случае, процесс локализации существенно зависит от толщины медной части. Так, на начальных этапах температура в медной части имеет довольно однородное распределение. Затем наблюдается возникновение локальных максимумов температуры и деформации на расстоянии чуть меньше 3 мм от границы между материалами. Далее, в зависимости от толщины медного слоя возможны два варианта. Если толщина меди менее 5 мм, то максимум сдвигается к самой границе и в дальнейшем практически вся пластина имеет нулевую скорость, а двигается только граничная точка. Если толщина медного слоя достаточно велика, то локализация деформации происходит внутри медной части бруса.

Увеличение начальной скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}_0$ до значения 10^4 с^{-1} приводит к образованию двух областей, в которых локализуется деформация для всех рассматриваемых композитных блоков. Данные области располагаются симметрично относительно левой и правой границы меди и лежат в среднем на расстоянии 0.8 мм от ее границ. Однако спустя некоторое время в одной из областей наблюдается резкий рост температуры и деформации. Если толщина меди меньше 7 мм, то ПАС образуется справа – рядом сдвигающейся границей, при выборе толщины медной части от 7 мм ПАС образуется слева – рядом с грани-

Рис. 3. (a) – максимальное значение температуры; (b) – минимальное значение напряжения; (c) – максимальное значение деформации; (d) – максимальное значение скорости пластической деформации. Образцы высотой 1 мм – 4 мм, 2 мм – 3 мм, 2 мм – 8 мм, 2 мм – 6 мм (линии сплошная, пунктирная, точечная и точка-тире соответственно)

Fig. 3. (a) – maximum value of temperature; (b) – minimum value of stress; (c) – maximum value of strain; (d) – maximum value of plastic strain rate. Specimen height 1 mm – 4 mm, 2 mm – 3 mm, 2 mm – 8 mm, 2 mm – 6 mm (solid, dashed, dotted, dashed-dotted line respectively)

цей между материалами. Данное явление уже наблюдалось ранее в работе [20] при исследовании процесса взаимодействия полос сдвига между собой.

Численные эксперименты показывают, что как в случае образования нескольких областей локализации, так и в случае образования одной, существует характерное расстояние ξ (глубина), на котором локализуется деформация (в качестве примера см. Рис. 4а). В свою очередь, глубина локализации зависит от параметра $\dot{\epsilon}_0$. Графическое представление данной зависимости дано на Рис. 4б. Из Рис. 4 видно, что глубина локализации обратно пропорциональна начальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$. При низкой начальной скорости деформации медь нагревается более равномерно,

Рис. 4. (а) – распределение температуры в образце 2 мм – 8 мм при различных граничных условиях при $\dot{\epsilon}^p = 10^4 c^{-1}$ и $\epsilon_{ном} = 2$; (б) – зависимость расстояния ξ от начальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$ в образце 2 мм – 8 мм при различных граничных условиях

Fig. 4. (a) – temperature distribution in specimen 2 mm – 8 m at different boundary conditions and $\dot{\epsilon}^p = 10^4 c^{-1}$ and $\epsilon_{ном} = 2$; (b) – dependence of distance ξ from initial strain rate $\dot{\epsilon}_0$ in specimen 2 mm – 8 mm at different boundary conditions

а деформации успевают проникнуть в глубь бруса. В свою очередь, при увеличении $\dot{\epsilon}_0$ брус нагревается по краям, и там же очень быстро накапливаются большие деформации. Величина ξ зависит в большей степени от значения $\dot{\epsilon}_0$ и гораздо меньше подвержена влиянию толщины бруса и соотношению материалов в нем. Так, по Рис. 4b можно довольно хорошо оценивать глубину, на которой локализуются деформации, если толщина медной или стальной части находится в пределах 2 – 20 мм. Если при нулевых граничных условиях ширина медной части менее 2ξ , то в этом случае деформация локализуется в центре медной части, что происходит, к примеру, в образце 2 мм – 4 мм и скорости $\epsilon_0 = 10^3 c^{-1}$ ($\xi \approx 3$ мм). В случае нулевого теплового потока на границе бруса толщина меди меньше некоторого значения, деформация локализуется на подвижной границе, этот случай реализуется, к примеру, в образце 2 мм – 4 мм и скорости $\epsilon_0 = 10^3 c^{-1}$ ($\xi \approx 3$ мм).

Заключение

В работе рассмотрены процессы локализации пластической деформации в композитном материале, состоящем из стали и меди. Для описания данного физического процесса предложена математическая модель. Разработан численный алгоритм и проведена его верификация. Показана эффективность данного алгоритма.

Установлено, что генерация возмущений, приводящих к локализации пластической деформации в изучаемом образце, происходит за счет наличия стыка между материалами. Установлено, что пластическая деформация локализуется в более хрупкой части образца, т.е. в медной её части. Также показано, что в зависимости от

параметров задачи и ширины стальной и медной части образца имеет место процесс образования одной или двух областей локализации, отстоящих от границ в среднем на одно и то же расстояние. Показано, что в основном величина данного расстояния изменяется за счет изменения начальной скорости пластической деформации, причем данная зависимость имеет вид гиперболы. Помимо этого, исследовано влияние граничных условий на процесс локализации и выявлены характерные особенности данного процесса.

Список литературы / References

- [1] Schneider J., Nunes J. A., "Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld", *Metall. Mater. Trans. B.*, **35** (2004), 777–783.
- [2] Seidel T., Reynolds A., "Visualization of the material flow in aa2195 friction stir welds using a marker insert technique", *Metall. Mater. Trans.*, **32A** (2001), 2879–2884.
- [3] Moss G., *Shear strains, strain rates, temperature changes in adiabatic shear bands*, In: Meyers L. MurrShock L. (Eds.), *Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals*, 1981.
- [4] Rogers H. C., "Adiabatic plastic deformation", *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **9** (1979), 283.
- [5] Bai Y., Dodd B., *Adiabatic Shear Localization*, Pergamon press, Oxford, 1992.
- [6] Lee W. S., Liu C. Y., Chen T. C., "Adiabatic shearing bends havior of different steels under extreme high shear loading", *Journal of Nuclear Materials*, **374** (2008), 313–319.
- [7] Gupta G., Was G. S., Alexandreanu B., "Grain boundary engineering of ferritition martensitic alloy T91", *Metallurgical and Materials Transaction A*, **35** (2004), 717–719.
- [8] Rittel D., "Adiabatic shear failure of a syntactic polymeric foam", *Materials Letter*, **59** (2005), 723–732.
- [9] Shockey D. A. et.al., "Shear failure of inconel 718 under dynamic loads", *Experimental Mechanics*, **47** (2007), 723–732.
- [10] Wright T. W., *The phisics and mathematics of adiabatic shear bands*, Cambridge University Press, 2002.
- [11] Marchand A., Duffy J., "An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel", *J. Mech. Phys. Solids*, **36** (1988), 251–283.
- [12] Kolsky H., "An investigation of the mechanical properties of materials at very. High rates of loading", *Proc. Phys. Soc.*, **62-B** (1949), 676.
- [13] Nesterenko V. F., Bondar M. P., "Investigation of Deformation Localization by the 'Thick-Walled Cylinder' Method", *DYMAT journal*, **1** (1994), 245–251.
- [14] Zhou F., Wright T. W., Ramesh K. T., "A numerical methodology for invesigating the formation of adiabatic shear bands", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **54** (2006), 904–926.
- [15] Zhou F., Wright T. W., Ramesh K. T., "The formation of multiple adiabatic shear bands", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **54** (2006), 1376–1400.
- [16] Batra R. C., Wei Z. G., "Shear bands due to heat flux prescribed at boundaries", *Int. J. Plast.*, **22** (2006), 1–15.
- [17] Kudryashov N. A., Ryabov P. N., Zakharchenko A. S., "Self-organization of adiabatic shear bands in OFHC copper and HY-100 steel", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **76** (2015), 180–192.
- [18] Walter J. W., "Numerical experiments on adiabatic shear band formation in one dimension", *International Journal of Plasticity*, **8** (1992), 657–693.

- [19] Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н., *Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике* (2-е изд.), М.: Наука, 1978; [Rozhdestvenskij B. L., Yanenko N. N., *Sistemy kvazilinejnykh uravnenij i ih prilozheniya k gazovoj dinamike*, М.: Nauka, 1978, (in Russian).]
- [20] Кошкин В. И., Кудряшов Н. А., Рябов П. Н., “Численное моделирование образования полос адиабатического сдвига при деформациях”, *Ядерная физика и инжиниринг*, **1** (2010), 465–474; [Koshkin V. I., Kudryashov N. A., Ryabov P. N., “Chislennoe molelirovanie obrazovaniya polos adiabaticheskogo sdviga pri deformatsiyah”, *Yadernaya fizika i inzeniring*, **1** (2010), 465–474, (in Russian).]

Kudryashov N. A., Muratov R. V., Ryabov P. N., "Numerical Simulation of Adiabatic Shear Bands Formation in Composites", *Modeling and Analysis of Information Systems*, **23:3** (2016), 298–308.

DOI: 10.18255/1818-1015-2016-3-298-308

Abstract. The process of plastic flow localization under shear deformations of a composite material consisting from welded steel and copper is studied. A mathematical model describing this physical process is proposed. A new numerical approach based on Courant–Isaacson–Rees scheme is suggested. This algorithm was verified using three benchmark problems. Operability and effectiveness of this algorithm is confirmed. A numerical simulation of plastic flow localization in composite materials is performed. The influence on localization process of boundary conditions, of initial strain rate and materials width is studied. It is shown that at the initial stage the shear velocity of material layers oscillates. Theoretical estimates of frequency and oscillation period is given. Computational results coincide with these estimates. It is found that plastic flow localizes in the copper part of the composite. One or two areas of plastic flow localization appears depending on the width of steel and copper parts, as well as on the initial plastic strain rate and the selected type of a boundary conditions. The areas locate on characteristic distance from borders. The dependence of this distance and initial strain rate is shown and the corresponding estimates are obtained for two types of boundary conditions. When two areas of localization are formed, in one of them the temperature and the deformation increases faster than in another one.

Keywords: shear band, deformation localization, plastic deformation, numerical simulation

On the authors:

Kudryashov Nikolay Alexeevich, orcid.org/0000-0001-5926-9715, PhD, Dr. Sci., professor
 National research nuclear university MEPhI,
 Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia, e-mail: nakudr@gmail.com

Muratov Rodyon Vladimirovich, orcid.org/0000-0002-4574-4412, graduate student,
 National research nuclear university MEPhI,
 Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia, e-mail: rodyon-mur@yandex.ru

Ryabov Pavel Nikolaevich, orcid.org/0000-0002-3780-9204, PhD,
 National research nuclear university MEPhI,
 Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia, e-mail: pnyabov31@gmail.com

Acknowledgments:

This work was supported by Russian Science Foundation, project to support research carried out by individual research groups No. 14-11-00258