



ISSN 2076-2151

О

М

Д

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ



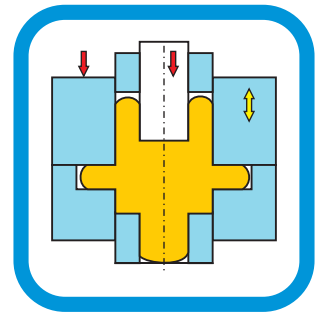
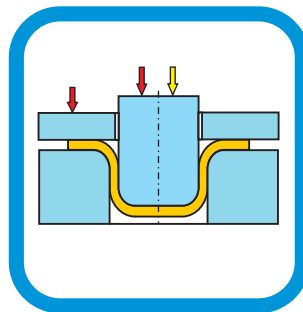
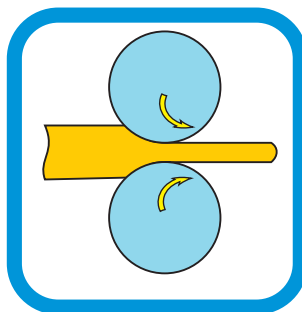
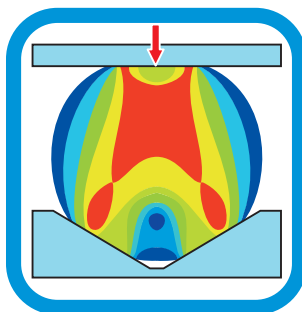
ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ



MATERIALS WORKING BY PRESSURE



UMFORMTECHNIK



№1 (26)



2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ
И СПОРТА УКРАИНЫ

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ

**ОБРАБОТКА
МАТЕРИАЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

№ 1 (26) – 2011

Краматорск

УДК 621.7

**ОБРАБОТКА
МАТЕРИАЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ**

**Сборник научных трудов
№ 1 (26) – 2011**

Основатель
Донбасская государственная
машиностроительная академия
Свидетельство
про государственную регистрацию
серия КВ № 13770-2744Р
от 17.03.2008

**ОБРОБКА
МАТЕРІАЛІВ
ТИСКОМ**

**Збірник наукових праць
№ 1 (26) – 2011**

Засновник
Донбаська державна
машинобудівна академія
Свідоцтво
про державну реєстрацію
серія КВ № 13770-2744Р
від 17.03.2008

**MATERIALS
WORKING BY
PRESSURE**

**Collection of science papers
№ 1 (26) – 2011**

Founder
Donbass State
Engineering Academy
Registration certificate
№ 13770-2744Р
dated 17.03.2008

Сборник «ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» включен в Перечень научных специализированных изданий ВАК Украины по техническим наукам для опубликования результатов диссертационных работ (постановление № 1–05/2 от 27.05.09 г., бюллетень ВАК Украины № 8, 2009).

Рекомендовано к печати ученым советом Донбасской государственной машиностроительной академии (протокол № 7 от 31.03.2011).

В сборнике размещены статьи различных направлений процессов и машин обработки материалов давлением, подготовленные профессорско-преподавательским составом, научными сотрудниками, аспирантами, соискателями, специалистами. Сборник предназначен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов.

У збірнику розміщено статті різних напрямків процесів і машин обробки матеріалів тиском, підготовлені професорсько-викладацьким складом, науковими співробітниками, аспірантами, здобувачами, фахівцями. Збірник призначений для наукових й інженерних працівників, аспірантів і студентів.

Different articles of various directions of processes and machines of materials forming, prepared by the faculty, scientific employees, post-graduate students, competitors, experts are placed in this collection. The collection is intended for scientific and engineering workers, post-graduate students and students.

Редакционная коллегия: Алиев И. С., д-р техн. наук, проф. (председатель редакционной коллегии); Бейгельзимер Я. Е., д-р техн. наук, проф.; Доброносков Ю. К., канд. техн. наук, доц., (ответственный секретарь); Гуменюк Ю. И., д-р техн. наук, проф. (Россия); Дья Х., д-р техн. наук, проф. (Польша); Заблоцкий В. К., д-р техн. наук, проф.; Кассов В. Д., д-р техн. наук, проф.; Лаптев А. М., д-р техн. наук, проф.; Миленин А. А., д-р техн. наук, проф. (Польша); Мороз Б. С., д-р техн. наук, проф. (Россия); Огородников В. А., д-р техн. наук, проф.; Роганов Л. Л., д-р техн. наук, проф.; Розенберг О. А., д-р техн. наук, проф.; Сатонин А. В., д-р техн. наук, проф.; Соколов Л. Н., д-р техн. наук, проф.; Сосенушкин Е. Н., д-р техн. наук, проф. (Россия); Тарасов А. Ф., д-р техн. наук, проф.; Титов В. А., д-р техн. наук, проф.; Федоринов В. А., канд. техн. наук, проф.; Шестаков Н. А., д-р техн. наук, проф. (Россия); Яковлев С. С., д-р техн. наук, проф. (Россия).

Ответственный за выпуск д-р техн. наук, проф. Алиев И. С.

Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – 274 с.

ISSN 2076-2151

Статьи прорецензированы членами редакционной коллегии.
Материалы номера печатаются на языке оригинала.

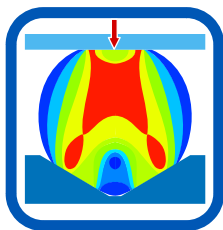
ISSN 2076-2151

© Донбасская государственная
машиностроительная академия, 2011
© Донбаська державна машинобудівна
академія, 2011
© Donbass State Engineering Academy, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ЗМІСТ

CONTENT

РАЗДЕЛ I
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Алюшин Ю. А., Кузнецов С. А.

Механические и физические характеристики материалов в энергетической модели деформаций

3

Александров А. А., Ковальчук А. И.

О некоторых графических построениях к расчетам процессов пластической деформации металлов

11

Каргин С. Б., Марков О. Е., Кухарь В. В.

Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния слитка при ковке на трехлепестковую заготовку

17

Сивак Р. И., Нахайчук О. В., Сивак И. О.

Влияние геометрии траектории нагружения на пластичность

22

Михалевич В. М., Краевский В. А., Краевский С. А., Павлюк А. И.

Структура тензорной модели накопления повреждений с учетом «памяти направлений» для многоэтапного деформирования

26

Алиева Л. И., Абхари П., Бондарева Е. Н.

Анализ напряженного состояния при радиальном выдавливании методом измерения твердости

30

Нарыжный А. Г., Тараненко М. Е.

Вычислительная компьютерная модель электрогидравлической листовой штамповки

34

Рябичева Л. А., Смоляк В. В.

Моделирование и экспериментальное исследование РКУ-прессования порошковых пористых заготовок

41

Титов В. А., Титов В. В.

Влияние трения при выглаживании на распределение напряжений в приповерхностном слое

46

Данченко В. Н., Ремез О. А., Себастиан Мроз, Огинский И. К., Самсоненко А. А.

Определение катающего диаметра валков при прокатке в вытяжных калибрах

52

Кириенко А. А.

Определение частей поглощенной энергии при прокатке под влиянием факторов трения

58

Руденко Е. А., Литвиненко Б. С., Саливан С. В.

Силовые параметры редуцирования слябов с многократным обжатием в калиброванных вертикальных валках

63

Пеев В. М.

Совершенствование геометрии профиля заходной части инструмента поперечно-клиновой прокатки 67

Сатонин А. В., Бобух В. И., Картавенко А. С., Жуков П. Л.

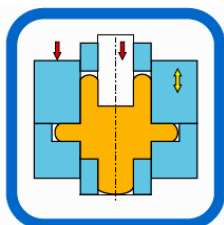
Конечно-элементное математическое моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки относительно толстых листов и полос 72

Сатонин А. В., Настоящая С. С.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации процессов горячей прокатки относительно тонких лент и полос на основе силового подхода 76

Федоринов В. А., Спаская А. М., Заковашевич Н. А., Коряченко Н. А.

Математическое моделирование степени использования запаса пластичности на кромках холоднокатаных лент и полос 81



РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Грушко А. В.

Упрочнение поверхностного слоя трубчатой заготовки при деформирующем протягивании 85

Огородников В. А., Алиева Л. И., Кожушаный В. М., Деревенько И. А.

Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением 91

Хван А. Д., Хван Д. В., Евдокимова Н. А.

Пластическая устойчивость сжимаемых пластин 99

Чухлеб В. Л., Ключев Д. Ю., Прокопенко И. С., Ашкелянец А. В.

Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» 103

Данченко В. Н., Дья Х., Головки А. Н., Берски Ш., Беляев С. М.

Исследование влияния геометрических характеристик заготовки и матрицы на формоизменение при прессовании биметаллических алюминиево-магниевого прутков 107

Матвийчук В. А.

Обоснование подхода к разработке технологических процессов изготовления сложнопрофильных кольцевых заготовок холодной торцевой раскаткой 113

Васильків В. В.

Технології та обладнання для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок 119

Гуменюк Ю. И., Лобов В. А.

Теоретическое обоснование процесса вытяжки с утонением стенки по внутреннему контуру 128

Гунько И. В., Скрябин С. А., Чайка Д. С.

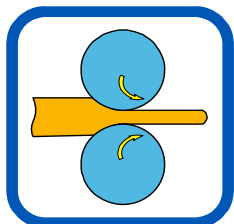
Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов 134

Баглюк Г. А.

Влияние деформационных параметров на структуру и свойства горячештампованных порошковых материалов 139

Лантев А. М., Руденко Н. А.

Изготовление градиентных порошковых фильтров с применением порообразователя 146



РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

Добронос Ю. К., Иванов А. А., Кралин А. К., Махмудов К. Д.

Анализ влияния на энергосиловые параметры основных технологических и конструктивных параметров механического оборудования при производстве трапециевидных заготовок 150

Максименко О. П., Романюк Р. Я., Романюк К. В.

Анализ устойчивости процесса прокатки с учётом продольных сил 154

Соснев И. Ю., Шломчак Г. Г.

Теоретические аспекты физического моделирования процессов прокатки реологически сложных металлов с пониженной пластичностью 160

Иванов А. В.

Исследование морфологии дефектов, выявленных в сортовом прокате при ультразвуковом контроле 165

Панченко А. И., Тумко А. Н., Сальников А. С., Ярошенко О. А., Пересащенко О. В.

Формирование качества подшипниковых сталей в процессах деформационного передела 170

Головченко А. П., Григоренко В. У., Пилипенко С. В.

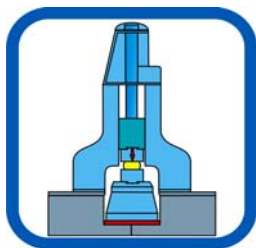
Исследование поперечной разностенности труб при ведении процесса ХПТ с различными режимами выполнения подачи и поворота трубы 175

Мищенко О. В., Григоренко В. У., Пилипенко С. В.

Експериментальні дослідження зміни поперечної різностінності тонкостінних труб при прокатці на станах ХПТР з подачею та поворотом перед прямим та зворотним ходом кліті 179

Середа Б. П., Григоренко В. У., Онищенко А. Н., Середа Д. Б.

Исследование физико-механических свойств труб, полученных по пильгерной технологии 183



РАЗДЕЛ IV ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Рей Р. И., Гутько Ю. И.

Повышение надежности и энергетической эффективности бесшаботного вертикального гидравлического молота 188

Балалаева Е. Ю.

Расчет универсальных упругих поворотных компенсаторов погрешностей системы «пресс-штамп» для операции вытяжки-формовки 193

Роганов Л. Л., Чоста Н. В.

Исследование трения на контактных поверхностях клиношарнирного механизма 199

Степанов Б. А.

Исследования исполнительных механизмов кривошипных прессов с вращающимся штамподержателем 203

Гожій С. П., Ландар Р. М., Носенко А. І.

Класифікація обладнання для штампування обкочуванням 209

Маркечко И. В., Грязнов В. В., Штеле В. Г., Панков А. Ю.

Разработка технологии и инструмента для штамповки деталей вентиляционных решеток 215

Боташев А. Ю., Мусаев А. А.

Исследование и разработка двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки 221

Луценко В. А., Коваленко О. А., Боровик П. В.

Анализ напряженного состояния поверхности разделительного инструмента после упрочнения электроискровым легированием 227

Артюх Г. В., Сорочан Е. Н.

Выбор оптимальных параметров трещиновых соединений 232

Дрожжа П. В., Угрюмов Ю. Д., Добряк В. Д., Угрюмов Д. Ю., Шилов А. К.

Эффективные технические решения для совершенствования производства труб на пилигримовых станах 236

АННОТАЦИИ

242

УДК 621.77

Михалевич В. М.
Краевский В. А.
Краевский С. А.
Павлюк А. И.

СТРУКТУРА ТЕНЗОРНОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ «ПАМЯТИ НАПРАВЛЕНИЙ» ДЛЯ МНОГОЭТАПНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Представление повреждения макрочастицы материала в виде тензора позволило описать широкий класс экспериментальных данных, который не вмещался в рамки скалярных моделей. Но все же ряд эффектов, которые встречаются при многоэтапном изменении направления холодного пластического деформирования (например существенный разброс экспериментальных данных в случае, когда косинус излома траектории деформирования меньше нуля и на предыдущих этапах практически полностью исчерпан ресурс пластичности материала [1]), в существующих современных моделях разрушения не находят своего отображения. Результаты анализа свидетельствуют, что простым усложнением функций, которые входят в модель разрушения материалов, как правило, невозможно достичь значительного улучшения адекватности модели [2]. Соответственно, усложнение модели должно происходить путем выдвижения физически обоснованных концепций и базироваться на учете этих концепций в самой структуре модели.

Для построения тензорной модели накопления повреждений в работе [3] выдвигается гипотеза, что внезапное изменение направления деформирования сопровождается постепенным поворотом главных направлений тензора повреждений. И в результате главные направления тензора накопления повреждений и главные направления тензора приращений деформаций становятся соосными только после накопления определенной степени пластической деформации. На основе этой гипотезы в работе [4] построена структура тензорно-линейной модели с учетом «памяти направлений» для случая двухэтапного изменения направления холодного пластического деформирования. Как показала проверка адекватности предложенной модели [5], учет «памяти направлений» способствует лучшему количественному и качественному соответствию экспериментальным данным двухэтапного деформирования, особенно в случае, когда косинус излома траектории деформирования меньше нуля.

Целью этой работы является обобщение структуры тензорно-линейной модели накопления повреждений с учетом «памяти направлений» на случай многоэтапного изменения направления холодного пластического деформирования.

За базовую возьмем тензорно-линейную модель, которая предложена Г. Д. Делем [6]:

$$\psi_{ij}(\varepsilon_u) = \int_0^{\varepsilon_u} F(\varepsilon_u, \eta, \mu_\sigma) \cdot \beta_{ij} \cdot d\varepsilon_u, \quad (1)$$

где ψ_{ij} – тензор повреждений; ε_u – накопленная деформация; $F(\varepsilon_u, \eta, \mu_\sigma) = \frac{df}{d\varepsilon_u}$ – положительная функция, которая зависит от характеристик материала; $f(\varepsilon_u, \varepsilon^*_c(\eta, \mu_\sigma))$ – функция повреждаемости; β_{ij} – направляющий тензор приращений деформаций; η, μ_σ – параметры напряженно-деформированного состояния.

Под многоэтапным деформированием понимается процесс, который можно разбить на отдельные этапы, в пределах которых деформирование является стационарным. Относительно многоэтапного деформирования для m -ого этапа модель (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \psi_{ij}(\varepsilon_u) = & \beta_{ij}^{(1)} \cdot \int_0^{\varepsilon_u^{(1)}} F(\varepsilon_u; \eta^{(1)}; \mu_\sigma^{(1)}) \cdot d\varepsilon_u + \beta_{ij}^{(2)} \cdot \int_{\varepsilon_u^{(1)}}^{\varepsilon_u^{(1)} + \varepsilon_u^{(2)}} F(\varepsilon_u; \eta^{(2)}; \mu_\sigma^{(2)}) \cdot d\varepsilon_u + \dots + \\ & + \beta_{ij}^{(m)} \cdot \int_{\varepsilon_u^{(1)} + \varepsilon_u^{(2)} + \dots + \varepsilon_u^{(m-1)}}^{\varepsilon_u} F(\varepsilon_u; \eta^{(m)}; \mu_\sigma^{(m)}) \cdot d\varepsilon_u, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon_u^{(r)}$, $\beta_{ij}^{(r)}$ – накопленная деформация и направляющий тензор приращений деформаций на r -ом этапе соответственно.

Одним из постулатов, на основе которых построена модель (1), является соосность главных направлений тензоров накопления повреждений и приращений пластических деформаций. Если откинуть этот постулат и предположить, что главные направления тензора накопления повреждений постепенно поворачиваются, то относительно m -этапного деформирования направляющий тензор накопления повреждений можно представить в виде:

$$\beta_{ij}(\varepsilon_u) = \begin{cases} \beta_{ij}^{(1)}, 0 \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(1)}; \\ \beta_{ij}^{(12)}, \varepsilon_u^{(1)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(1)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(1)}; \\ \beta_{ij}^{(2)}, \varepsilon_u^{(1)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(1)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(2)}; \\ \beta_{ij}^{(23)}, \varepsilon_u^{(2)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(2)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(2)}; \\ \dots \\ \beta_{ij}^{(m-1)}, \varepsilon_u^{(m-2)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(m-2)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(m-1)}; \\ \beta_{ij}^{(m-1,m)}, \varepsilon_u^{(m-1)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^{(m-1)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(m-1)}; \\ \beta_{ij}^{(m)}, \varepsilon_u^{(m-1)} + \Delta\varepsilon_{кр}^{(m-1)} \leq \varepsilon_u \leq \varepsilon_u^*, \end{cases} \quad (3)$$

где $\beta_{ij}^{(r)}$ – направляющий тензор приращений деформаций на r -ом этапе; $\beta_{ij}^{(r,r+1)}$ – направляющий тензор, который определяет положение главных направлений тензора накопления повреждений при их повороте от направления, которое совпадает с главными направлениями тензора приращений деформаций на r -ом этапе деформирования, к направлению, которое совпадает с главными направлениями тензора приращений деформации на $(r+1)$ -ом этапе деформирования. $\beta_{ij}^{(r,r+1)}$ представим как линейную комбинацию направляющих тензоров:

$$\beta_{ij}^{(r,r+1)} = \frac{(1 - \delta^{(r)}) \cdot \beta_{ij}^{(r)} + \delta^{(r)} \cdot \beta_{ij}^{(r+1)}}{\sqrt{(1 - \delta^{(r)})^2 + 2 \cdot \delta^{(r)} \cdot (1 - \delta^{(r)}) \cdot k_{r,r+1} + \delta^{(r)2}}}. \quad (4)$$

Параметр $\delta^{(r)}$ определяется накопленной деформацией на $(r+1)$ этапе деформирования и критической деформацией $\Delta\varepsilon_{кр}^{(r)}$, по достижению которой главные направления тензоров накопления повреждений и приращений пластических деформаций становятся соосными.

Накопленная до r -ого этапа деформация определяется по формуле:

$$\varepsilon_u^{(r)} = \sum_{q=1}^r \varepsilon_u^{(q)} + \sum_{q=1}^{r-1} \Delta\varepsilon_{кр}^{(q)}, \quad (5)$$

а деформация $\Delta\varepsilon_{кр}^{(r)}$:

$$\Delta \varepsilon_{кр}^{(r)} = \varepsilon_{*c}^{(r+1)} \cdot \frac{a}{a \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*c}^{(r)}}{\varepsilon_u^{(r)}} \right)^{2a}}, \quad (6)$$

где a – параметр, который зависит от материала.

Функция $\delta^{(r)}(\varepsilon_u)$ должна быть монотонно возрастающей на промежутке $[\varepsilon_H^{(r)}; \varepsilon_H^{(r)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(r)}]$ и удовлетворять условия:

$$\begin{cases} \delta(\varepsilon_H^{(r)}) = 0; \\ \delta(\varepsilon_H^{(r)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(r)}) = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Для выполнения условий (7) выбираем функцию:

$$\delta^{(r)} = \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_H^{(r)}}{\Delta \varepsilon_{кр}^{(r)}}. \quad (8)$$

Если разрушение достигается на конец m -ого этапа, то условие разрушения будет иметь вид [2]:

$$\sum_{q=1}^m g_q \sum_{r=1}^m g_r k_{qr} = 1, \quad (9)$$

где:

$$g_1 = f(\varepsilon_u^{(1)}, \varepsilon_{*1}) - f(0, \varepsilon_{*1}) + \int_{\varepsilon_u^{(1)}}^{\varepsilon_u^{(1)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(1)}} \frac{(1 - \delta^{(1)})}{\sqrt{(1 - \delta^{(1)})^2 + 2 \cdot \delta^{(1)} \cdot (1 - \delta^{(1)}) \cdot k_{12} + \delta^{(1)2}}} \cdot F(\varepsilon_u; \eta^{(2)}; \mu_\sigma^{(2)}) \cdot d\varepsilon_u; \quad (10)$$

$$g_r = f(\varepsilon_H^{(r)}, \varepsilon_{*c}^{(r)}) - f(\varepsilon_H^{(r-1)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(r-1)}, \varepsilon_{*c}^{(r)}) + \int_{\varepsilon_H^{(r-1)}}^{\varepsilon_H^{(r-1)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(r-1)}} \frac{\delta^{(r-1)}}{\sqrt{(1 - \delta^{(r-1)})^2 + 2 \cdot \delta^{(r-1)} \cdot (1 - \delta^{(r-1)}) \cdot k_{(r-1,r)} + \delta^{(r-1)2}} \times \\ \times F(\varepsilon_u; \eta^{(r)}; \mu_\sigma^{(r)}) \cdot d\varepsilon_u + \int_{\varepsilon_H^{(r)}}^{\varepsilon_H^{(r)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(r)}} \frac{\delta^{(r)}}{\sqrt{(1 - \delta^{(r)})^2 + 2 \cdot \delta^{(r)} \cdot (1 - \delta^{(r)}) \cdot k_{(r,r+1)} + \delta^{(r)2}} \times \\ \times F(\varepsilon_u; \eta^{(r+1)}; \mu_\sigma^{(r+1)}) \cdot d\varepsilon_u, \quad (11)$$

$r = 2, m - 1;$

$$g_m = f(\varepsilon_*, \varepsilon_{*c}^{(m)}) - f(\varepsilon_H^{(m-1)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(m-1)}, \varepsilon_{*c}^{(m)}) + \int_{\varepsilon_H^{(m-1)}}^{\varepsilon_H^{(m-1)} + \Delta \varepsilon_{кр}^{(m-1)}} \frac{\delta^{(m-1)}}{\sqrt{(1 - \delta^{(m-1)})^2 + 2 \cdot \delta^{(m-1)} \cdot (1 - \delta^{(m-1)}) \cdot k_{(m-1,m)} + \delta^{(m-1)2}} \times \\ \times F(\varepsilon_u; \eta^{(m)}; \mu_\sigma^{(m)}) \cdot d\varepsilon_u, \quad (12)$$

ε_* – накопленная до разрушения деформация; $\varepsilon_{*c}^{(r)} = \varepsilon_{*c}(\eta^{(r)}; \mu_{\sigma}^{(r)})$ – значение предельной деформации из диаграммы пластичности для r -ого этапа, напряженно-деформированное состояние которого характеризуется параметрами $\eta^{(r)}$ и $\mu_{\sigma}^{(r)}$; $k_{qr} = \beta_{ij}^{(q)} \cdot \beta_{ij}^{(r)}$ – косинус излома траектории деформирования.

Если r -ый этап начался до завершения поворота главных направлений тензора накопления повреждений, тогда косинус излома траектории деформирования:

$$k_{(r-1,r)} = \frac{\left(1 - \frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}}\right) \cdot \beta_{ij}^{(r-2)} + \frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}} \cdot \beta_{ij}^{(r-1)}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}}\right)^2 + 2 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}}\right) \cdot \frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}} \cdot k_{(r-2,r-1)} + \left(\frac{\varepsilon_u^{(r-1)}}{\Delta\varepsilon_{кр}^{(r-2)}}\right)^2}} \cdot \beta_{ij}^{(r)}. \quad (13)$$

Если разрушение на последнем этапе происходит до завершения поворота главных направлений тензора накопления повреждений, то:

$$g_m = \int_{\varepsilon_u^{(m-1)}}^{\varepsilon_*} \frac{\delta}{\sqrt{(1-\delta)^2 + 2 \cdot \delta \cdot (1-\delta) \cdot k_{(m-1,m)} + \delta^2}} \cdot F(\varepsilon_u; \eta^{(m)}; \mu_{\sigma}^{(m)}) \cdot d\varepsilon_u. \quad (14)$$

ВЫВОДЫ

Построена структура тензорно-линейной модели с учетом «памяти направлений» для случая многоэтапного изменения направления холодного пластического деформирования. Рассмотрены частные случаи, когда некоторые этапы начинаются и разрушение на последнем этапе происходит до завершения поворота главных направлений тензора накопления повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhalevich V. The comparative analysis of scalar and tensor models of damage accumulation on two-stage cold deformation example / V. Mikhalevich, V. Kraevsky, K. Kozlov // *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. – Iasi. – 2002. – Tomul XLXII(LI), fasc. 3–4. – P. 21–28.*
2. Михалеви́ч В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалеви́ч. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 195 с.
3. Тензорно-лінійна модель з врахуванням «пам'яті напрямів» при двохступеневому деформуванні / В. М. Михалеви́ч, В. А. Матвійчук, В. О. Краєвський, К. Є. Козлов // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ-Хмельницький : ДДМА. – 2002. – С. 13–15.*
4. Михалеви́ч В. М. Розробка структури тензорно-лінійної моделі накопичення пошкоджень із врахуванням «пам'яті напрямів» / В. М. Михалеви́ч, В. О. Краєвський // *Праці міжнародної науково-технічної конференції «Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах». – Вінниця : ВНТУ. – 2006. – С. 97–99.*
5. Михалеви́ч В. М. Математичне моделювання механіки формоутворення при холодному торцевому розкочуванні та ротаційній витяжці : монографія / В. М. Михалеви́ч, В. О. Краєвський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 188 с.
6. Дель Г. Д. Пластичность при немономонном деформировании / Г. Д. Дель. – Воронеж, 1982. – 10 с.

Михалеви́ч В. М. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;
 Краєвський В. А. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;
 Краєвський С. А. – магістр ВНТУ;
 Павлюк А. І. – студент ВНТУ.

ВНТУ – Винницький національний технічний університет, г. Вінниця.

E-mail: vkraevsky@mail.ru.