ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ
TECHNOLOGIES AND MACHINES FOR PRESSURE TREATMENT

Научная статья
УДК 621.777
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-78-88

ОЦЕНКА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА И МОДЕЛИ ТРЕНИЯ

Гангало Александр Николаевич[1,2],
Мирошниченко Светлана Вадимовна[1]

[1] Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина
[2] Институт физики горных процессов

[*] для корреспонденции: svmiro@mail.ru

Аннотация.
Актуальность работы обусловлена широкими возможностями технологии равноканального углового прессования (РКУП) для формирования уникальных структур в материалах, что требует глубокого понимания влияния всех параметров процесса. Гидростатическое давление является ключевым фактором, определяющим эволюцию микроструктуры при интенсивной пластической деформации, однако его зависимость от геометрии инструмента и условий трения исследована недостаточно полно. Данная работа посвящена количественной оценке влияния угла пересечения каналов и коэффициента контактного трения на величину гидростатического давления в очаге деформации при РКУП. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе DEFORM-2D проведено моделирование процесса для идеально-пластического материала. Исследован диапазон углов пересечения каналов в эффективном для формирования наноструктур диапазоне от 90° до 120° и коэффициентов трения Амонтона-Кулона от 0,05 до 0,3. Для проверки корректности результатов полученные численные результаты сопоставлены с известным аналитическим решением В.М. Сегала. Установлено, что увеличение угла канала приводит к снижению гидростатического давления на 34-51%, в то время как рост трения повышает его на 31–48%. Выявлены существенные расхождения между данными МКЭ и аналитической моделью в областях низкого трения при больших углах и высокого трения при малых углах. Показано, что эти расхождения объясняются формированием углового зазора или веерной зоны в очаге деформации, что не учитывается в классическом аналитическом подходе. На основе регрессионного анализа получена интерполяционная формула для расчета гидростатического давления. Определены критические значения коэффициентов трения, разграничивающие различные режимы течения металла, и установлена взаимосвязь между моделями трения Амонтона-Кулона и Зибеля применительно к РКУП. Результаты позволяют повысить точность при прогнозировании напряженного состояния заготовок и оптимизировать технологические параметры прессования для получения материалов с заданными свойствами.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
09 июня 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
равноканальное угловое прессование, метод конечных элементов, очаг деформации, гидростатическое давление, коэффициент трения, угол пересечения каналов

Для цитирования: Гангало А.Н., Мирошниченко С.В. Оценка гидростатического давления при

равноканальном угловом прессовании с учетом геометрии канала и модели трения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 78-88. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-78-88, EDN: OPLPPE

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FREZ-2026-0005.

Введение

Значительное внимание, уделяемое технологии равноканального углового прессования (РКУП), объясняется широкими возможностями в управлении свойствами материалов и формировании структур разного масштабного уровня [1–4]. Степень структурных изменений определяется технологическими параметрами деформирования. Для оценки преимуществ и рисков, связанных с изменением любого из этих параметров, наиболее распространенным инструментом является метод конечных элементов (МКЭ). Работы по моделированию РКУП с использованием данного метода наглядно демонстрируют влияние различных технологических факторов на определяющие эволюцию структуры характеристики [5–15]. В поиске оптимальных режимов РКУП оценивали эффективность конструктивных параметров процесса [5–9], маршрутов деформирования [2, 10] и исходных свойств материалов [7, 9, 11] в повышении интенсивности и однородности деформаций сдвига [5–9], изменения скорости деформации [9, 11–13], напряженного состояния заготовок [5, 11, 14] и силовых характеристик процесса [5, 8, 9]. Посредством МКЭ показано решающее воздействие контактного трения на деформационные [6, 7, 9], деформационно-скоростные [9, 13] и силовые характеристики процесса РКУП [5, 9, 15]. Наблюдаемое в работах [13, 16, 17] формирование и развитие веерной зоны с повышением коэффициента трения приводит к увеличению давления и росту неоднородности деформаций [7–9, 16].

Несмотря на кажущуюся исчерпанность, исследование процесса РКУП до сих пор сохраняет свою актуальность в совершенствовании режимов обработки и использования различных технологических приемов для получения субмикрокристаллических и наноструктурных материалов различного назначения [2, 3, 18–20], а метод конечных элементов продолжает оставаться востребованным инструментом в оценке его эффективности [21–23].

В предлагаемой работе с применением МКЭ показано влияние угла рабочего канала и условий трения на гидростатическую компоненту давления в очаге деформации. Гидростатическое давление представляет собой важнейший фактор, способствующий созданию благоприятных условий для микроструктурных изменений при интенсивном сдвиге [2, 4]. Его воздействие на разных масштабных уровнях было детально описано в ряде научных публикаций, в частности, в [4]. Тем не менее, развитие гидростатического давления в очаге деформации при изменяемой геометрии рабочего канала и различных режимах трения при РКУП не являлось предметом глубокого анализа ни в работах последних лет, ни в исследованиях предыдущих десятилетий. Выяснению взаимосвязи этих факторов посвящена настоящая работа.

Известным решением для определения гидростатического давления в области деформаций при РКУП является аналитическая модель В.М. Сегала, полученная на основе учета влияния трения по закону Амонтона-Кулона [1]. Настоящее исследование опирается на использование именно этого закона для учета сил трения при моделировании, поскольку модель Амонтона-Кулона предполагает экспоненциальное распределение нормального давления на стенки контейнера и дает близкие к реальным картины нагружения заготовок. Стоит подчеркнуть, что в большинстве исследований, проведенных на основе конечно-элементных расчетов, применение закона Кулона для описания сил трения встречается редко, и даже в этих случаях коэффициент трения ограничен значением 0.15 [6, 9]. Использование закона Зибеля при моделировании позволило изучить влияние контактного трения в широком диапазоне значений его коэффициента [5, 15]. Помимо этого, все известные аналитические решения, касающиеся анализа формирования зон застоя и изменения формы очага деформации, основываются именно на этом законе. Поэтому встает очередная задача в отыскании соответствия между величинами коэффициентов трения, определенных законами Амонтона-Кулона и Зибеля.

Цель работы – с использованием метода конечных элементов определить влияние контактного трения при различных углах рабочего канала на величину гидростатического давления в очаге деформации, сравнить полученные данные с существующим аналитическим решением, установить связь между коэффициентами трения Зибеля и Амонтона-Кулона при РКУП.

Методика исследования

Методика исследования основана на сравнении аналитических и численных решений.

Моделирование процесса с помощью метода конечных элементов

Задачу определения гидростатической компоненты в очаге деформаций решали в системе конечно-элементного моделирования DEFORM-2D.

Моделирование одного прохода РКУП проводили с учетом условий плоской деформации.

Для обеспечения достоверности оценок при сравнении результатов, полученных посредством моделирования, с результатами аналитического расчета нами использована идеализированная геометрия рабочей полости матрицы, исключающая влияние радиусов сопряжения каналов.

Значение угла пересечения каналов (Ф) изменяли в пределах 90º до 120º (шаг – 5º). Этот диапазон определен как наиболее эффективный в отношении структурообразования с максимальным эффектом при 90º и снижением после 120º [2, 24].

Плоскую заготовку с параметрами 100х20 мм смоделировали с использованием 9985 четырехузловых элементов со сгущением у стенок канала. Средний размер ребра ячейки равен 0,6 мм, в области сгущения – 0,2 мм. Чтобы избежать числовой нестабильности, связанной с критическим искажением формы элементов, использовали адаптивное перестроение сетки каждые десять шагов расчета. Для минимизации потерь объема, связанного с перестроением сетки, установлена константа штрафа 10^6.

Модель материала предполагали идеально-пластической с напряжением течения σ_s=100МПа, инструмент рассматривали как жесткие тела.

На поверхностях контакта заготовки с инструментом реализовано трение Амонтона–Кулона со значениями коэффициента трения в диапазоне μ=(0,05…0,3). Выбор малых значений коэффициента трения продиктован стремлением к уменьшению потерь на трение для снижения уровня рабочего давления процесса и, соответственно, повышения стойкости инструмента. Верхнее значение диапазона принято на основании справочных рекомендаций для холодного деформирования алюминия со смазкой как материала со склонностью к налипанию на рабочий инструмент [25].

Скорость перемещения пуансона принимали постоянной, v=1мм/с. Температура обработки составляла 20°С.

Чтобы обеспечить квадратичную сходимость метода Ньютона-Рафсона, используемого в решателе DEFORM-2D, установили шаг приращения времени 0.07с, а общее количество итераций до завершения расчета – 1100.

Аналитическая модель

При аналитическом подходе к расчету гидростатического давления использовали обобщенную зависимость, предложенную В.М. Сегалом [1], в которой пластическую постоянную представили как $k = \sigma_s / \sqrt{3}$, а значение гидростатического давления (p) выразили в относительных единицах (p'):

$$p' = \frac{p}{\sigma_s} = \frac{\mu + \operatorname{ctg}\frac{\Phi}{2}}{\sqrt{3}\left(1 - \mu\operatorname{ctg}\frac{\Phi}{2}\right)}, \quad (1)$$

где σ_s – напряжение течения материала, МПа.

Как при моделировании, так и при аналитическом подходе используются аналогичные упрощающие предположения и условия трения, основанные на законе Амонтона-Кулона. Оба метода опираются на усреднение относительной величины гидростатического давления вдоль линии пересечения каналов [26], что обеспечивает возможность прямого сопоставления полученных результатов.

Построение интерполяционной модели на основе результатов численного эксперимента

Для комплексной оценки связи исследуемых факторов использовали аппроксимационную математическую модель, получаемую обработкой результатов моделирования.

В качестве интерполяционной модели выбрана функция вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j,$$

где y – исследуемый параметр, b_0 – свободный член уравнения, $b_{i,j}$ – регрессионные коэффициенты при полиноме, $x_{i,j}$ – значения входных факторов.

Для расчета коэффициентов полинома результаты модельных решений обрабатывали в среде MS Excel по алгоритму регрессионного анализа. Общее качество уравнения регрессии оценивали с использованием коэффициента детерминации R^2. Проверку его статистической значимости проводили на основе F-критерия Фишера. Коэффициент R^2 считали значимым при попадании F_{obs} в критическую область ($F_{crit,\ \alpha}$, +∞). Для уровня значимости α=0,05 и общего числа измерений n=42 при двухфакторном анализе предельная величина критерия Фишера определена значением $F_{crit,0.05}$ = 3,24.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии использовался t-критерий Стьюдента. Расчетные значения t-статистики сопоставляли с теоретическим распределением Стьюдента при числе степеней свободы df = 39. Коэффициент признавали значимым, если t_{obs} превышал $t_{crit,0,05}$=2,02. Кроме того, рассчитанные в Excel p-значения сопоставлялись с заданным уровнем значимости α = 0,05. При $\boldsymbol{p < 0,05}$ фактор признавали значимым.

Степень адекватности уравнения регрессии определяли по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}\cdot 100\%,$$

где y_i – фактические значения; $\hat{y}_i$ – расчетные значения исследуемого параметра, полученные путем подстановки соответствующих значений входных факторов в уравнение регрессии.

Окончательное принятие аппроксимирующего уравнения осуществляли путем сравнения его точности при расчете значений гидростатического давления в каждой точке исследуемых интервалов.

Результаты

1. Влияние условий деформирования на величину гидростатического давления на оси пересечения каналов

Результаты моделирования демонстрируют характер изменения средней величины относительного гидростатического давления p' на оси пересечения каналов при рассмотрении предельных значений коэффициента трения μ (Рис. 1, а) и угла Ф (Рис. 1, б). На данном рисунке представлено сравнение данных численного моделирования с аналитическими решениями. Верификация результатов МКЭ (отмеченных маркерами) осуществлялась путем сопоставления с теоретической зависимостью (1), показанной штриховой линией.

Для практического использования результатов моделирования методом регрессионного анализа была получена математическая модель вида:

$$p' = 1{,}584 - 0{,}641\Phi + 1{,}227\mu, \qquad (2)$$

где значение Ф выражено в радианах.

Данная зависимость визуализируется на рисунке сплошной линией и с высокой точностью описывает функциональную связь величины гидростатического давления с условиями деформирования, что подтверждается хорошей сходимостью линии регрессии с данными МКЭ.

Адекватность модели (2) с достоверностью аппроксимации R^2=0,99 подтверждается значением F-критерия, превышающим критическое F_p=(548,5> 3,24). При этом средняя ошибка расчета $\bar{\varepsilon}$=0,04% указывает на возможность использования данного соотношения в качестве интерполяционной формулы для оценок p'.

Из модели (2) следует, что уровень гидростатического давления в большей степени зависит от величины коэффициента трения, и с повышением его значения увеличение угла Ф не приведет к существенному снижению гидростатического давления. Эффекта парного взаимодействия угла пересечения каналов и условий трения не выявлено.

Согласно Рис. 1, изменение угла рабочего канала от 90º до 120º приводит к падению гидростатического давления на ~51% для значения μ=0,05 и на ~34% для μ=0,3 (Рис. 1, а). Возрастание коэффициента трения от 0,05 до 0,3 влечет за собой рост гидростатического давления на ~31% при Ф=90º и на ~48% при Ф=120º (Рис. 1, б).

В Таблице 1 приведены выраженные в процентах расхождения модельного (МКЭ) и аналитического (1) расчетов средних величин относительного гидростатического давления вдоль оси пересечения каналов, определяемых выражением:

$$\delta p' = \frac{p'_{МКЭ} - p'_{(1)}}{p'_{МКЭ}}\cdot 100\%,$$

где $p'_{МКЭ}$ – средняя величина относительного гидростатического давления вдоль оси пересечения каналов по результатам расчета МКЭ, $p'_{(1)}$ – значение относительного гидростатического давления, вычисленное по соотношению (1).

Обсуждение

Согласно Таблице 1, наибольшее расхождение (14-16%) МКЭ с аналитическим решением (1) происходит в двух крайних случаях: при малых углах пересечения каналов и высоких значениях коэффициента трения, а также при больших углах пересечения каналов в условиях низкого трения. По мере отдаления от указанных случаев модели расчетов демонстрируют высокую степень соответствия результатов. Возникновение расхождений в результатах расчетов объясняется различными сценариями формирования очага деформаций под влиянием сил трения и угловых характеристик канала (Рис. 2), не учтенными в решении (1). Данное решение ориентируется на «идеальный» случай простого сдвига по прямой линии скольжения, ориентированной вдоль оси пересечения каналов [1]. В картинах МКЭ очаг деформации представлен в виде расширенной области, ограниченной двумя линиями интенсивного сдвига (Рис. 2, а). Даже при незначительном увеличении коэффициента трения очаг деформации расширяется, формируя веерную зону (Рис. 2, б) [9, 16, 17]. Влияние роста углового фактора проявляется в виде частичного незаполнения канала [6, 16], искривления формы очага деформации и смещения его оси от линии пересечения каналов [26] (Рис. 2, в).

Целесообразно проанализировать эти два механизма – формирование веерной зоны и незаполнения канала – более детально и определить условия трения по Кулону-Амонтону

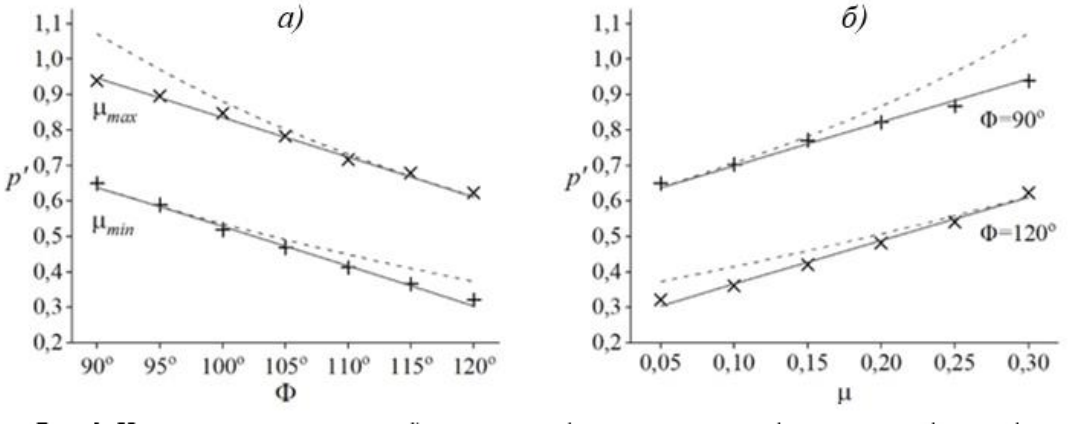

Рис. 1. Изменение относительной величины гидростатического давления: а – для предельных значений коэффициента трения в зависимости от угла пересечения каналов; б – для предельных значений угла пересечения каналов в зависимости от коэффициента трения

Fig. 1. Change in the relative value of hydrostatic pressure: a – for friction coefficient limit values depending on channel intersection angle; б – for channel intersection angle limit values depending on friction coefficient

Таблица 1. Расхождение данных аналитических и модельных расчетов средних значений относительной величины гидростатического давления вдоль оси пересечения каналов

Table 1. Difference between analytical and model calculations of hydrostatic pressure relative magnitude average value along the channel intersection axis

Угол пересечения каналов	Значение коэффициента трения Амонтона-Кулона					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
90º	1,8	-0,4	-1,3	-5,3	-10,8	-14,1
95º	**0,9**	-0,1	-1,1	-3,1	-8,3	-8,0
100º	-3,0	**0,3**	-2,1	-2,8	-3,5	-3,7
105º	-4,6	-2,3	**0,2**	0,9	-0,5	-2,2
110º	-8,7	-7,5	-2,4	**0,01**	0,3	-1,9
115º	-11,9	-10,6	-7,5	-5,1	**-1,1**	1,5
120º	-16,0	-15,1	-9,1	-5,3	-3,1	**1,6**

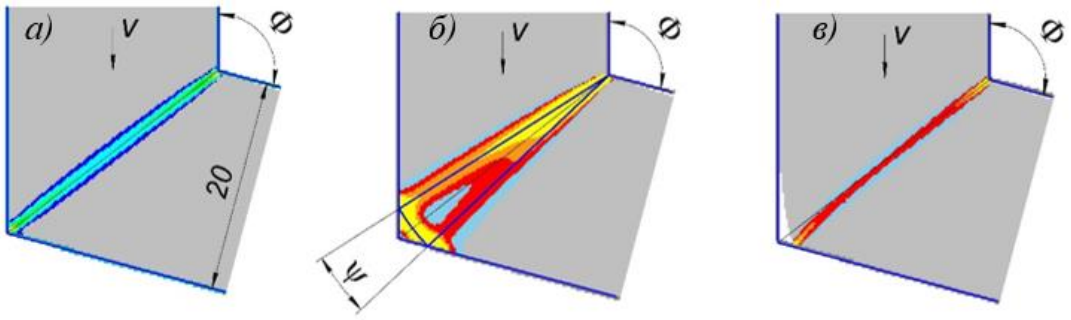

Рис. 2. Деформационные модели РКУП: а – согласованность аналитической и компьютерной моделей, б – формирование веерной зоны, в – частичное незаполнение канала

Fig. 2. ECAP deformation models: a – consistency of analytical and computer models, б – fan zone formation, в – not a complete filling of the channel

для получения идеализированного случая в процессе РКУП. Для этого, опираясь на решения МКЭ, установим связь между коэффициентами двух моделей трения по Кулону-Амантону и Зибелю, где имеется аналитическое решение [17], определим границы, в пределах которых расхождение между расчетом по соотношению (1) и решением МКЭ является незначительным.

2. Формирование веерной зоны

Чтобы увязать расхождения в расчетных данных (Таблица 1), в исследовании использовали аналитическое решение,

рассматривающее увеличение веера очага деформации с изменением условий деформирования [17] (Рис. 2, б). Основываясь на законе Зибеля, это решение связывает силу трения и угол рабочего канала с угловым размером веерной зоны, характеризуемого величиной:

$$\psi = \pi - \Phi - arccos(m), \quad (3)$$

где m – коэффициент трения Зибеля.

Опираясь на это решение, определяем взаимосвязь коэффициентов трения Амонтона-Кулона (μ) и Зибеля (m) через угловой размер веерной зоны (ψ) по следующему алгоритму.

Оценку проводили для наиболее часто реализуемого в практике РКУП случая, когда Ф = 90°.

Используя поля скоростей деформаций, рассчитанных МКЭ для значений коэффициента трения μ=(0.05..0.3), измеряли величину угла ψ, поскольку в условиях отсутствия трения m=μ=0 интервал значений μ был расширен до теоретического нуля.

Для каждого ψ вычисляли значения фактора трения, применяя полученное из формулы (3) соотношение:

$$m = -cos(\Phi + \psi). \quad (4)$$

Графики зависимости коэффициентов трения Зибеля (m) и Амонтона-Кулона (μ) от угла раскрытия веерной зоны ψ представлены на Рис. 3.

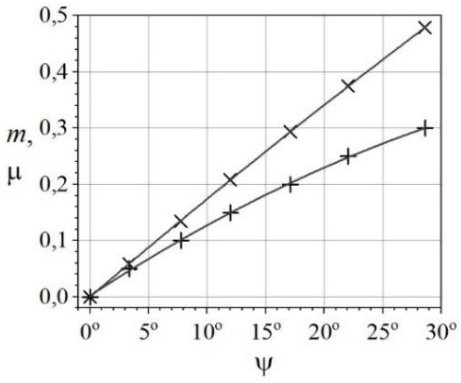

Рис. 3. Зависимость коэффициентов трения m (×) и μ (+) от угла раскрытия веерной зоны

Fig. 3. Dependence of the friction coefficients m (×) and μ (+) on the angle of the fan zone

Соотношение значений коэффициентов трения в рабочем канале определяли из условия:

$$\psi(m) = \psi(\mu).$$

Зависимость ψ(μ) получили аппроксимацией данных МКЭ, используя значения угла ψ, выраженные в радианах:

$$\psi = 1{,}65\mu - 0{,}02\mu. \quad (5)$$

Приравнивая правые части выражений (3) и (5), получаем соотношение коэффициентов трения для Ф=90º в виде:

$$\mu = 0{,}96 - 0{,}61\, arccos(m). \quad (6)$$

Графическая оценка взаимосвязи коэффициентов трения m(μ) для случая Ф=90º дана на Рис. 4.

3. Оценки взаимосвязи параметров РКУП с учетом частичного незаполнения канала

Как отмечалось ранее, расхождение между данными моделирования и аналитическими решениями (Таблица 1) также определяется образованием зазора в области внешнего угла пересечения каналов и смещением плоскости сдвига в сторону выходного канала. Для учета этих особенностей в работе [26] представлена методика интерпретации результатов МКЭ, позволяющая достичь высокой сходимости численных и аналитических решений.

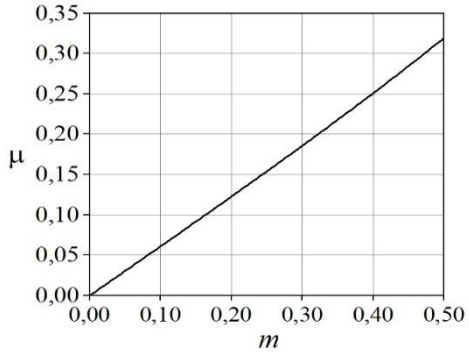

Рис. 4. Графическое соотношение коэффициентов трения Кулона и Зибеля при РКУП идеально-пластического материала при Ф=90º

Fig. 4. Graphical relationship between Coulomb and Siebel friction coefficients for ECAP of a perfectly plastic material at Ф=90º

С целью анализа взаимосвязи исследуемых параметров, а также для сопоставления коэффициентов трения по Зибелю и Амонтону-Кулону в настоящей работе принято условие заполнения углового зазора, предшествующее началу формирования веерной зоны. Данное условие обеспечивает максимально близкие параметры к идеальному процессу РКУП и практически полное соответствие оценок по соотношению (1) результатам конечно-элементного моделирования. В Таблице 1 соответствующие значения выделены жирным шрифтом. При использовании модели учета трения Зибеля это условие определяют критическим коэффициентом [16]:

$$m_{cr} = -cos(\Phi). \quad (7)$$

Критические значения коэффициента Амонтона-Кулона μ_{cr}, ниже которых заполнение канала не происходит, определяли эмпирически на основе расчета МКЭ вариантов деформирования при углах Ф, равных 90º,100º,110º,120º. На Рис. 5 приведено соотношение критических значений

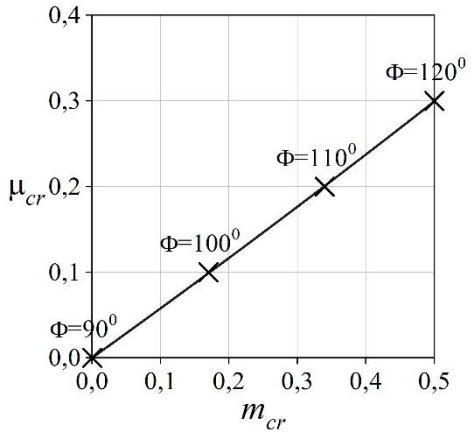

Рис. 5. Графическое соотношение коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля в рабочем канале при изменении угла его наклона

Fig. 5. A graphical comparison of the Amonton's-Coulomb and Siebel friction coefficients in the working channel as a function of its intersection angle

коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля для данных углов.

Соотношение критических коэффициентов трения в условиях полного заполнения канала (до начала расширения веерной зоны) можно представить в виде:

$$\mu_{cr} = 0.08 m_{cr}^2 + 0{,}56 m_{cr}. \quad (8)$$

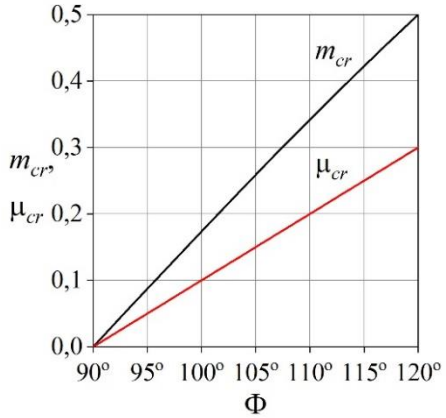

Рис. 6. Зависимость критических коэффициентов трения Амонтона-Кулона и Зибеля от угла пересечения каналов

Fig. 6. Dependence of the critical Amonton's-Coulomb friction coefficients on the channel intersection angle

С использованием выражений (7) и (8) построена графическая зависимость, связывающая критические коэффициенты трения с угловым параметром канала (Рис. 6).

Зависимость μ_{cr}(Ф) аппроксимировали полиномиальной функцией:

$$\mu_{cr} = 0.57\Phi - 0.9. \quad (9)$$

Здесь значения параметра Ф выражены в радианах.

Практическое значение полученных соотношений

Установленные взаимосвязи между моделями трения открывают возможность для гибкого применения методов расчета. Ключевым ориентиром при этом служит критический коэффициент трения μ_{cr}, очерчивающий область высокой сходимости результатов аналитического и модельного решений, поэтому область использования аналитической модели (1) охватывает те сочетания геометрических параметров канала и коэффициента трения, при которых выполняется условие заполнения канала до момента формирования веерной зоны.

Полученное в работе (2) является универсальным, поскольку помимо идеализированного для РКУП случая оно учитывает ключевые факторы, определяющие условия течения материала, как формирование веерной зоны при увеличении коэффициента трения выше критического уровня ($\mu > \mu_{cr}$), так и случай частичного незаполнения канала, возникающий при совместном действии низкого трения и больших углов рабочего канала ($\mu < \mu_{cr}$).

Выводы

1. На основе метода конечных элементов получены результаты совместного влияния угловой характеристики рабочего канала и коэффициента трения Амонтона-Кулона на величину гидростатического давления на оси пересечения каналов. Показано, что с увеличением угла пересечения каналов от 90º до 120º в зависимости от условий трения уровень гидростатического давления снижается на 34-51%, причем большее влияние изменения угла Ф проявляется при низком трении. Рост коэффициента трения от 0,05 до 0,3 увеличивает гидростатическое давление на 31% при Ф=90º и на 48% при Ф=120º.

2. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования с аналитическим решением В.М. Сегала. В исследуемом диапазоне параметров РКУП показано расхождение свыше 15% между аналитическим решением и данными конечно-элементного расчета в оценках гидростатического давления на оси пересечения каналов, что обосновано необходимостью учета формирования углового зазора и веерной зоны. Предложено аналитическое выражение, позволяющее оценивать величину гидростатического давления

на оси пересечения каналов с учетом данных факторов.

3. С использованием метода линий скольжения и конечно-элементного анализа определены критические значения коэффициента трения Амонтона-Кулона, разграничивающие режимы формирования углового зазора и веерной зоны очага деформаций. Для каждого режима получено аналитическое выражение, связывающее критические значения коэффициентов трения Амотнона-Кулона и Зибеля.

4. Даны практические рекомендации по использованию полученных соотношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. [и др.] Процессы пластического структурообразования. Минск : Навука і тэхніка, 1994. 232 с.
2. Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Kawasaki, M., & Langdon T. G. Ultrafine-Grained Materials. TMS. Cham : Springer International Publishing, 2025. 170 p. DOI: 10.1007/978-3-0.31-31729-3.
3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y. [et al.] Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // Materials Research Letters. 2022. Vol. 10. № 4. Pp. 163–256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779.
4. Утяшев Ф. З., Рааб Г. И, Валитов В. А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. СПб. : Наукоемкие технологии, 2020. 185с. ISBN: 978-5-6044793-9-1.
5. Xu S., Zhao G., Ren G., Ma X. Numerical simulation and experimental investigation of pure copper deformation behavior for equal channel angular pressing/extrusion processes // Computation material science. 2008. Vol. 44. Pp. 251–259. DOI: 10.1016/j.commatsci.2008.03.032.
6. Luis-Perez C. J., Gonzales P., Garces Y. Equal channel angular extrusion in a commertial Al-Mn alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 143. Pp. 506–511. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00307-8.
7. Dumoulin S., Roven H. J., Werenskiold J. C., Valberg H. S. Finite element modeling of equal channel angular pressing: Effect of material properties, friction and die geometry // Materials Science and Engineering: A. 2005. Vol. 410. Pp. 248–251. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.103.
8. Zou Z., Xu S., Gao R., Xue X. [et al.] Deformation mechanism finite element analysis and die geometry optimization of magnesium alloys by equal channel angular processing // Int. Journal of Simul. Multidisci. Des. Optim. 2023. Vol. 14 Art. 15. Pp. 1–8. DOI: 10.1051/smdo/2023013.
9. Li S., Bourke M. A. M., Beyerlein I. J. [et al.] Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion // Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 382. Pp. 217–236. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.
10. Yilmaz T. A., Totik Y., Senoz G. M. L., Bostan B. Microstructure evolution and wear properties of ECAP treated Al-Zn-Mg alloy: effect of route, temperature and number of passes // Mater. Today Commun. 2022. Vol. 33. Pp. 1–3. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104628.
11. Semiatin S. L., DeLo D. P., Shell E. B. The effect of material properties and tooling design on deformation and fracture during equal channel angular extrusion // Acta Materialia. 2000. Vol. 48(8). Pp. 1841–1851. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00019-7.
12. Kim H. S. Evaluation of strain rate during equal-channel angular pressing // Journal of Materials and Research. 2002. Vol. 17. Pp. 172–178. DOI: 10.1557/JMR.2002.0026.
13. Спусканюк В. З., Гангало А. Н., Давиденко А. А. Влияние условий равноканального углового прессования на скорость деформации заготовок // ФТВД. 2010. Т. 20. № 4. С. 135–147.
14. Nagasekhar A. V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H. P. Stress and strain histories in equal channel angular extrusion/pressing // Materials Science and Engineering A. 2006. Vol. 423. Pp. 143–147. DOI: 10.1016/j.msea.2005.09.127.
15. Djavanroodi F., Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation // Materials Science and Engineering A. 2010. Vol. 527(4). Pp. 1230–1235. DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.052
16. Eivani A. R., Taheri A. K. An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 182. Pp. 555–563. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.021.
17. Segal V. M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion // Materials Science and Engineering A. 2003. Vol. 345. Pp. 36–46. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00258-7.
18. Milad Daghigh, Maryam Mohri, Mahmoud Nili-ahmadabadi. Tailoring Deformation Homogeneity of WE43 Alloy through Strain Rate Sensitivity and Back Pressure during Equal Channel Angular Pressing // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. Vol. 33(22). Pp. 12604–12619. DOI: 10.1007/s11665-024-09970-x.
19. Боткин А. В., Валиев Р. З., Волкова Е. П., Худододова Г. Д., Ebrahimi R. Влияние предварительной деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры при РКУП-обработке магниевых сплавов // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 4. С. 63–72. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_4_63-72.
20. Волкова Е. П., Боткин А. В., Валиев Р. З. Исследование и разработка технологии изготовления УМЗ прутков из магниевого сплава

Mg-1%Zn-0,18%Ca комбинированным методом экструзии и РКУП // В книге: Биоматериалы: от исследований к практике. Сборник материалов Международной конференции. Москва. 2025. С. 66–67.

21. Wongsa-Ngam J., Noraphaipaksa N., Kanchanomi C. [et al.] A study of die parameters influencing the plastic deformation for 3D finite element simulations of equal-channel angular pressing // J. Mater Sci. 2025. Vol. 60. Pp. 14207–14220. DOI: 10.1007/s10853-025-11249-y.

22. Alsheikh H., Rozhnov A., Rogachev S., Grabco D., Shikimaka O. Simulation of stress-strain state of Zr1.0%Nb alloy during equal-channel angular pressing: part 2. stress distribution // Romanian Journal of Physics. 2025. Vol. 70. № 604. Pp. 1–13. DOI: 10.59277/RomJPhys.2025.70.604.

23. Lutchenko N., Yordanova R., Arbuz A. Study of the effect of equal-channel angular pressing on the closure of casting defects in zirconium alloys // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. T. 60. № 2. 2025. Pp. 345–358. DOI: 10.59957/jctm.v60.i2.2025.17.

24. Nakashima K., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal channel angular pressing // Acta Mater. 1998. Vol. 46. Pp. 1589–1599. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00355-8.

25. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справ. изд. М. : Металлургия, 1982. С. 312.

26. Гангало А. Н., Мирошниченко С. В. Исследование влияния геометрии рабочего канала на гидростатическое давление в процессе равноканального углового прессования // Вопросы материаловедения. 2025. № 2 (122). С. 50–61. DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-50-61.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Об авто*рах:
Гангало Александр Николаевич, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», младший научный сотрудник, ФГБНУ Институт физики горных процессов (283114, Российская Федерация, ДНР, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72), канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-5683-1346, e-mail: al-gangalo@yandex.ru
Мирошниченко Светлана Вадимовна, научный сотрудник, ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина» (283114, Россия, ДНР, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72), ORCID: 0000-0003-1362-6283, e-mail: svmiro@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
Гангало Александр Николаевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, выводы.
Мирошниченко Светлана Вадимовна – концептуализация исследования, обзор соответствующей литературы, моделирование и обработка результатов МКЭ, сбор и анализ данных, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

EVALUATION OF HYDROSTATIC PRESSURE IN EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING CONSIDERING CHANNEL GEOMETRY AND FRICTION MODEL

Alexandr N. Gangalo[1,2], Svetlana V. Miroshnichenko[1]

[1] Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin
[2] Institute of Physics of Mining Processes

* for correspondence: svmiro@mail.ru

Abstract.
The relevance of this work stems from the substantial potential of Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) for producing unique material structures, which

Article info
Received:
09 June 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *equal channel angular pressing, finite element method, plastic deformation zone, hydrostatic pressure, friction coefficient, channel intersection angle*

necessitates a comprehensive understanding of the influence of all process parameters. Hydrostatic pressure is a key factor governing microstructure evolution during severe plastic deformation; however, its dependence on tool geometry and friction conditions has not been fully elucidated. This study is dedicated to the quantitative assessment of the effect of the channel intersection angle and the contact friction coefficient on the magnitude of hydrostatic pressure within the deformation zone during ECAP. Using the finite element method (FEM) within the DEFORM-2D software package, the process was simulated for an ideal plastic material. The investigation covered channel intersection angles within the range effective for nanostructure formation, specifically from 90° to 120°, and Amontons-Coulomb friction coefficients ranging from 0.05 to 0.3. To verify the accuracy of the results, the obtained numerical data were compared with the known analytical solution by Segal. It was established that an decrease in the channel angle leads to a reduction in hydrostatic pressure by 34–51%, whereas an increase in friction elevates it by 31–48%. Significant discrepancies between the FEM data and the analytical model were identified in regions of low friction combined with large angles, and high friction combined with small angles. It is demonstrated that these discrepancies are attributable to the formation of a corner gap or a fan zone within the deformation zone, phenomena not accounted for in the classical analytical approach. Based on regression analysis, an interpolation formula for calculating hydrostatic pressure was derived. Critical values of the friction coefficients delineating different metal flow modes were determined, and the relationship between the Amontons-Coulomb and Siebel friction models in the context of ECAP was established. The results enable improved accuracy in predicting the stress state of billets and facilitate the optimization of pressing parameters for obtaining materials with targeted properties.

For citation: Gangalo A.N., Miroshnichenko S.V. Evaluation of hydrostatic pressure in equal channel angular pressing considering channel geometry and friction model. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):78-88. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-78-88, EDN: OPLPPE

REFERENCES

1. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. i dr. Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya. Minsk: Navuka i tekhnika; 1994. 232s.

2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Kawasaki M., Langdon T.G. Ultrafine-Grained Materials. TMS. Cham: Springer International Publishing; 2025. 170 p. DOI: 10.1007/978-3-0.31-31729-3.

3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y. [et al.] Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters.* 2022; 10(4):163-256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779.

4. Utyashev F.Z., Raab G.I, Valitov V.A. Deformacionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov: monografiya. Sankt-Peterburg.: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 185 s. ISBN: 978-5-6044793-9-1.

5. Xu S., Zhao G., Ren G., Ma X. Numerical simulation and experimental investigation of pure copper deformation behavior for equal channel angular pressing/extrusion processes. *Computation material science.* 2008; 44:251-259. DOI: 10.1016/j.commatsci.2008.03.032.

6. Luis-Perez C.J., Gonzales P., Garces Y. Equal channel angular extrusion in a commertial Al-Mn alloy. *Journal of Materials Processing Technology.* 2003; 143:506-511. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00307-8.

7. Dumoulin S., Roven H.J., Werenskiold J.C., Valberg H.S. Finite element modeling of equal channel angular pressing: Effect of material properties, friction and die geometry. *Materials Science and Engineering: A.* 2005; 410:248-251. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.103.

8. Zou Z., Xu S., Gao R., Xue X. [et al.] Deformation mechanism finite element analysis and die geometry optimization of magnesium alloys by equal channel angular processing. *Int. Journal of Simul. Multidisci. Des. Optim.* 2023; 14(15):1-8. DOI: 10.1051/smdo/2023013.

9. Li S., Bourke M.A.M., Beyerlein I.J. [et al.] Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering A.* 2004; 382:217-236. DOI: 10.1016/j.msea.2004.04.067.

10. Yilmaz T.A., Totik Y., Senoz G.M.L., Bostan B. Microstructure evolution and wear properties of ECAP treated Al-Zn-Mg alloy: effect of route, temperature and number of passes. *Mater. Today Commun.* 2022; 33:1-3. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104628.

11. Semiatin S.L., DeLo D.P., Shell E.B. The effect of material properties and tooling design on deformation and fracture during equal channel angular extrusion. *Acta Materialia.* 2000; 48(8):1841-1851. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00019-7.

12. Kim H.S. Evaluation of strain rate during equal-channel angular pressing. *Journal of Materials and Research.* 2002; 17:172-178. DOI: 10.1557/JMR.2002.0026.

13. Spuskanyuk V.Z., Gangalo A.N., Davidenko A.A. Vliyanie uslovij ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya na skorost' deformacii zagotovok. *FTVD.* 2010; 20(4):135-147.

14. Nagasekhar A.V., Tick-Hon Y., Li S., Seow H.P. Stress and strain histories in equal channel angular extrusion/pressing. *Materials Science and Engineering A.* 2006; 423:143-147. DOI: 10.1016/j.msea.2005.09.127.

15. Djavanroodi F., Ebrahimi M. Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation. *Materials Science and Engineering A.* 2010; 527(4):1230-1235. DOI: 10.1016/j.msea.2009.09.052

16. Eivani A.R., Taheri A.K. An upper bound solution of ECAE process with outer curved corner. *Journal of Materials Processing Technology.* 2007; 182:555-563. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.021.

17. Segal V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering A.* 2003; 345:36-46. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00258-7.

18. Milad Daghigh, Maryam Mohri, Mahmoud Nili-ahmadabadi. Tailoring Deformation Homogeneity of WE43 Alloy through Strain Rate Sensitivity and Back Pressure during Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2024; 33(22):12604-12619. DOI: 10.1007/s11665-024-09970-x.

19. Botkin A.V., Valiev R.Z., Volkova E.P., Khodododova G.D., Ebrahimi R. Vliyanie predvaritel'noy deformatsii na formirovanie ul'tramelkozernistoy struktury pri PKU-obrabotke magnievykh splavov. *Fizicheskaya mezomekhanika.* 2024; 27(4)63-72. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_4_63-72.

20. Volkova E.P., Botkin A.V., Valiev R.Z. Issledovanie i razrabotka tekhnologii izgotovleniya UMZ prut-kov iz magnievogo splava Mg-1%Zn-0,18%Ca kombinirovannym metodom ekstruzii i PKU. *V knige: Biomaterialy: ot issledovaniy k praktike. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy konferentsii.* Moskva. 2025. S. 66-67.

21. Wongsa-Ngam, J., Noraphaipaksa, N., Kanchanomi, C. [et al.] A study of die parameters influencing the plastic deformation for 3D finite element simulations of equal-channel angular pressing. *J. Mater Sci.* 2025; 60:14207-14220. DOI: 10.1007/s10853-025-11249-y.

22. Alsheikh H., Rozhnov A., Rogachev S., Grabco D., Shikimaka O. Simulation of stress-strain state of Zr1.0%Nb alloy during equal-channel angular pressing: part 2. stress distribution. *Romanian Journal of Physics.* 2025; 70(604):1-13. DOI: 10.59277/RomJPhys.2025.70.604.

23. Lutchenko N., Yordanova R., Arbuz A. Study of the effect of equal-channel angular pressing on the closure of casting defects in zirconium alloys. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2025; 60(2):345-358. DOI: 10.59957/jctm.v60.i2.2025.17.

24. Nakashima K., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal channel angular pressing. *Acta Mater.* 1998; 46:1589-1599. DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00355-8.

25. Grudev A.P., Zil'berg Yu.V., Tilik V.T. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem. Sprav, izd. M.: Metallurgiya; 1982. S. 312.

26. Gangalo A.N., Miroshnichenko S.V. Issledovanie vliyaniya geometrii rabochego kanala na gidrostatiches-koe davlenie v protsesse ravnokanál'nogo uglovogo pressovaniya. *Voprosy materialovedeniya.* 2025; 2(122):50-61. DOI: 10.22349/1994-6716-2025-122-2-50-61.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Alexander N. Gangalo, Head of the Laboratory, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin, Junior Researcher, Institute of Physics of Mining Processes (283048, Russian Federation, DPR, Donetsk, Str. R. Luxemburg 72), Cand. Sci. (Eng.), ORCID: 0000-0001-5683-1346, e-mail: al-gangalo@yandex.ru

Svetlana V. Miroshnichenko, Research Scientist, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after A.A. Galkin (283048, Russian Federation, DPR, Donetsk, Str. R. Luxemburg 72), ORCID: 0000-0003-1362-6283, e-mail: svmiro@mail.ru

Contribution of the authors:

Alexander N. Gangalo – setting a research task, scientific management, conceptualization of research, writing a text, conclusions.

Svetlana V. Miroshnichenko – conceptualization of research, a review of the relevant literature, simulation and processing of FEM results, data collection and analysis, writing a text, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.